

Institut de physique du globe de Paris



2016
2017

Rapport annuel
Annual report



U-S-PC
Université Sorbonne
Paris Cité

Sommaire

Contents

- 4 Un établissement hors du commun
An out of the ordinary institution
- 6 Personnels et chiffres clés
Staff and key figures
- 10 Intérieurs de la Terre et des planètes
Earth and planetary interiors
- 16 Risques naturels
Natural hazards
- 24 Système Terre
Earth system science
- 32 Origines
Origins
- 40 Observatoires
Observatories
- 56 Enseignement
Teaching
- 68 Relations internationales et partenariats
International relationships and partnerships
- 74 Vie de l'établissement
Institution's life

Intérieurs
de la Terre
et des planètes
Earth and
planetary
interiors

Risques
naturels
Natural hazards

Système Terre
Earth system
science

Origines
Origins



Rapport annuel de l'institut de physique du globe de Paris • 1 rue Jussieu 75238 Paris cedex 05 • www.ipgp.fr

Conception et réalisation graphique : service communication Medi@terre • mediaterre@ipgp.fr

Rédaction : personnels de l'IPGP et service communication Medi@terre

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

Traduction : personnels de l'IPGP et Shannon Kiernan

Photos et illustrations : banque d'images IPGP (personnels et service communication de l'IPGP) • Kleinfen • Yves Lion • NASA • CNES • CNRS • Agence Idé • USGS EROS • Labex UnivEarthS • Alain Nicolas Architecte • Thibaut Vergoz • AGU • Carl Diner - Fondation L'Oréal • Stéphane Félicité • Clément Stalhberger

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, teacher-researchers, PhD students, engineers, technicians and administrative staff who participated in this issue.

Éditorial Editorial



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

Marc Chaussidon

Directeur de l'IPGP / IPGP Director

"Créé il y a bientôt une centaine d'années, l'institut de physique du globe de Paris est aujourd'hui une institution de recherche de tout premier plan qui se caractérise par une très grande diversité des questions scientifiques abordées et des approches développées. Les travaux que nous menons en sciences de la Terre, des planètes et de l'environnement conjuguent observations sur les continents, en mer et depuis l'espace, analyse et expérimentation en laboratoire et modélisation quantitative. Ils s'appuient sur les observatoires dont l'IPGP a la responsabilité, les plateformes analytiques et de calcul qu'il opère, les parcs instrumentaux qu'il déploie et sur ses laboratoires spatiaux. Véritable carrefour où étudiants, doctorants, post-doctorants et scientifiques du monde entier se croisent et construisent avec tous les personnels de l'institut la science de demain, l'IPGP s'implique tout particulièrement dans les grandes questions sociétales liées aux risques naturels telluriques ou au changement climatique.

partenariats, nous développons des collaborations étroites avec la plupart des autres grands laboratoires français de la communauté des sciences de la Terre et des planètes.

Nous sommes partie prenante de la création de la future Université de Paris, qui devrait voir le jour en janvier 2019 à partir de la fusion des universités Paris Diderot et Paris Descartes et de notre intégration. Ce rassemblement d'établissements à la pointe de l'enseignement supérieur et de la recherche permettra à notre institut de jouer un rôle important face aux grands enjeux scientifiques et sociétaux de notre époque. L'obtention en mars 2018 du label Idex pour l'Université de Paris et ses partenaires est un premier pas déterminant.

Ce premier numéro du rapport annuel a pour ambition de vous faire partager notre enthousiasme pour toutes les recherches que nous menons. Il présente un instantané des activités de l'institut pour la période 2016-2017, avec quelques résultats scientifiques emblématiques dans les quatre grandes thématiques de l'institut : intérieurs de la Terre et des planètes, risques naturels, système Terre et origines.

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

"L'IPGP s'implique tout particulièrement dans les grandes questions sociétales liées aux risques naturels telluriques ou au changement climatique.

The IPGP is particularly involved in the major societal questions related to telluric natural hazards and climate change."

"Founded nearly one hundred years ago, the institut de physique du globe de Paris is today a major research institution that is characterised by the great diversity in the scientific questions that it addresses and in the approaches that it develops. Our work in Earth, planetary and environmental sciences combines observations on the continents, at sea and from space, as well as laboratory analysis and experimentation along with quantitative modelling. It draws upon the observatories for which the IPGP is responsible, the analytic and computing platforms that it operates, the range of instruments that it deploys and its space laboratories. Being a veritable crossroads where students, doctoral students, postdoctoral researchers and scientists from around the world can come together and work with the institute's staff to develop the science of tomorrow, the IPGP is particularly involved in the major societal questions related to telluric natural hazards and climate change.

laboratory for the French National Centre for Space Studies (CNES). Beyond these partnerships, the IPGP develops close collaborations with most other major French laboratories in the Earth and planetary science community.

We are a stakeholder in the creation of the future "Université de Paris", which should be completed in January 2019 from the merger of Paris Diderot University and Paris Descartes University, along with our integration. This assembly of leading higher education and research institutions will make it possible for our institute to play an important role in the major scientific and societal issues of our time. The obtention in March 2018 of the IDEX label for the Université de Paris and its partners was a first determining step.

This first issue of the annual report aims to share with you our enthusiasm for all of the research that we are undertaking. It offers a glimpse into the institute's activities for 2016-2017 along with some representative scientific results in the institute's four main focusses: Earth and planetary interiors, natural hazards, Earth system science and origins.

Happy reading and welcome at the institut de physique du globe de Paris!"

Our institute carries out its research, observation and educational missions with its institutional partners: the French National Centre for Scientific Research (CNRS) via the National Institute for Sciences of the Universe (INSU), Paris Diderot University, the University of Reunion Island and, as of 2019, the National Institute of Geographic and Forest Information (IGN). The IPGP is also a space

Un établissement hors du commun

An out of the ordinary institution

L'institut de physique du globe de Paris est un grand établissement d'enseignement supérieur et de recherche indépendant piloté par un conseil d'administration (présidé par Olivier Peyret, président de Schlumberger France) et un conseil scientifique. Il est membre de la COMUE (communauté d'universités et d'établissements) Université Sorbonne Paris Cité (USPC) et associé au centre national de la recherche scientifique (CNRS) sous la forme d'une unité mixte de recherche, l'UMR 7154, en partenariat avec l'université Paris Diderot, et d'une unité mixte de service, l'UMS 3454.

Il rassemble environ 150 chercheurs de très haut niveau recrutés dans le monde entier, 170 ingénieurs et gestionnaires et plus d'une centaine de doctorants de tous pays partageant la même passion pour les sciences de la Terre et des planètes. De nombreux accords de coopération sont mis en place avec des institutions étrangères prestigieuses, permettant des échanges scientifiques permanents dans le monde entier.

Organisme de recherche en géosciences de renommée mondiale, l'IPGP étudie la Terre et les planètes depuis le noyau jusqu'aux enveloppes fluides les plus superficielles, à travers l'observation, l'expérimentation et la modélisation. Une attention toute particulière est portée aux observations de longue durée qui sont essentielles pour l'étude des systèmes naturels. L'IPGP a la charge de services d'observation labellisés en volcanologie, sismologie, magnétisme, gravimétrie et érosion à travers ses observatoires permanents sur les îles de Guadeloupe, de la Martinique, de la Réunion et à Chambon-la-Forêt (France métropolitaine). Par ailleurs, l'IPGP équipe et entretient deux réseaux géophysiques mondiaux qui suivent les variations du champ magnétique (réseau INTERMAGNET) et l'activité sismique du globe (réseau GEOSCOPE).

L'IPGP héberge des moyens de calcul puissants et des installations expérimentales de dernière génération et bénéficie d'un soutien technique de premier plan. Sa structure souple facilite l'émergence d'équipes de recherche dans les domaines les plus prometteurs.

L'IPGP est responsable de plusieurs formations en master et en doctorat, en étroite collaboration avec l'université Paris Diderot. Un programme de formation avancée en imagerie géophysique est proposé en commun avec l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris et plusieurs partenaires industriels (CGG Veritas, Schlumberger, Shell, Total). ■

The institut de physique du globe de Paris is a major institution for higher education and independent research, piloted by an executive board (chaired by Olivier Peyret, chairman of Schlumberger France) and a scientific council. The IPGP belongs to the University Sorbonne Paris Cité COMUE (community of universities and institutions) and is affiliated with the French National Centre for Scientific Research (CNRS) as a joint research unit (UMR 7154), in partnership with Paris Diderot University, and joint service unit (UMS 3454).

It brings together around 150 top-tier researchers recruited from around the world, 170 engineers and administrators and over a hundred PhD students from the world over that share the same passion for Earth and planetary sciences. The IPGP has numerous cooperation agreements with prestigious foreign institutions, making it possible to have ongoing scientific exchanges all across the world.

A world-renowned geosciences organisation, the IPGP studies the Earth and the planets from their core to their outermost fluid envelopes through observation, experimentation and modelling. Particular focus is placed on long-term observations, which are essential in the study of natural systems. The IPGP is in charge of certified observation services in volcanology, seismology, magnetism, gravimetry and erosion through its permanent observatories in Guadeloupe, Martinique and Reunion Island and in Chambon-la-Forêt in mainland France. The IPGP also equips and maintains two global geophysics networks that monitor variation in the magnetic field (INTERMAGNET network) and seismic activity (GEOSCOPE network) around the globe.

The IPGP hosts powerful computational resources and next-generation experimental facilities with top-tier technical support. Its flexible structure facilitates the emergence of research teams in the most promising fields.

The IPGP is responsible for several master's and doctoral degrees in close collaboration with Paris Diderot University. An advanced training program in geophysical imaging is proposed jointly with MINES ParisTech and several industrial partners (CGG Veritas, Schlumberger, Shell, Total). ■



© Yves Lion



© Kleinfen

La ceinture de feu est une ligne imaginaire qui relie les nombreux volcans qui bordent l'océan pacifique. Elle suit en grande partie la plaque pacifique. On observe dans cette zone la plus grande activité sismique du globe, avec un nombre de volcans émergés supérieur à 400.

Cette longue guirlande volcanique passe par la pointe méridionale de l'Amérique du Sud (cordillère des Andes), remonte le long de l'Amérique centrale et des zones côtières de l'Amérique du Nord (chaîne des cascades aux États-Unis), se poursuit jusqu'en Alaska, rejoint les Îles Aléoutiennes, le Japon ainsi que les Philippines, elle contourne l'Australie pour englober les îles Fidji et la Nouvelle-Zélande dans le Pacifique Sud. Cette ligne mesure 40 000 kilomètres, comme la circonférence de la Terre.

L'intervention artistique d'Angela Detanico et Rafael Lain, par un principe de mise à plat et de mise à l'échelle, transpose cette ligne sur les façades du bâtiment de l'institut de physique du globe de Paris. Le bâtiment est ainsi ceinturé par une ligne de néons, inscrite dans la pierre des quatre façades, à la manière de la ceinture de feu qui entoure le globe. Cette ligne lumineuse respecte les données et emplacements des volcans.

The ring of fire is an imaginary line that links the numerous volcanoes that bound the Pacific ocean. This line follows for the most part the edge of the Pacific tectonic plate. The most intense seismic activity in the world is to be found in the vicinity of this line, with a number of subaerial volcanoes in excess of 400.

This great volcanic chain can be followed from the southern tip of South America (Andean Cordillera) through Central America and along the western coast of North America (Cascades range of the United States) to reach Alaska. It then links the Aleutian Islands, Japan and the Philippines, and rounds Australia to take in the Fijian Islands and New Zealand in the South Pacific. This line measures 40,000 kilometres as does the circumference of the Earth.

The artistic conception of Angela Detanico and Rafael Lain, via a principle of projection on to a flat surface and scaling, transposes this line on to the facade of the building of the institut de physique du globe de Paris. The building is thus girdled by a line of neon lights, attached to the stone of its four facades in the same way that the ring of fire circles the globe. This line of light respects the data describing the locations of the volcanoes.

Le Pavillon Curie : l'ancien laboratoire de Marie Curie

La réhabilitation de ce lieu de mémoire en hommage à Marie et Pierre Curie a été réalisée avec le soutien de la Ville de Paris, la volonté de la direction de l'IPGP de réaliser cette évocation, l'aide et les conseils de passionnés ainsi que le talent des équipes de Tania Rotbart, décoratrice et scénographe. Le projet a consisté à rééquiper en instruments et appareils de chimie la partie la plus authentique du Pavillon Curie pour lui redonner l'aspect d'un laboratoire de 1906 et de permettre au public de visiter le site lors d'évènements particuliers.

The Curie Pavilion: Marie Curie's former laboratory

This site was rehabilitated in homage to Marie and Pierre Curie thanks to the support of the City of Paris, the desire of the IPGP's directors to create such a living reminder, the advice and assistance of passionate individuals and the talent of the teams working with decorator and scenographer Tania Rotbart. The project involved furnishing the most authentic part of the Curie Pavilion with various instruments and devices to give it the appearance of a laboratory in the year 1906 and to make it possible for the public to visit the site during special events.



© IPGP

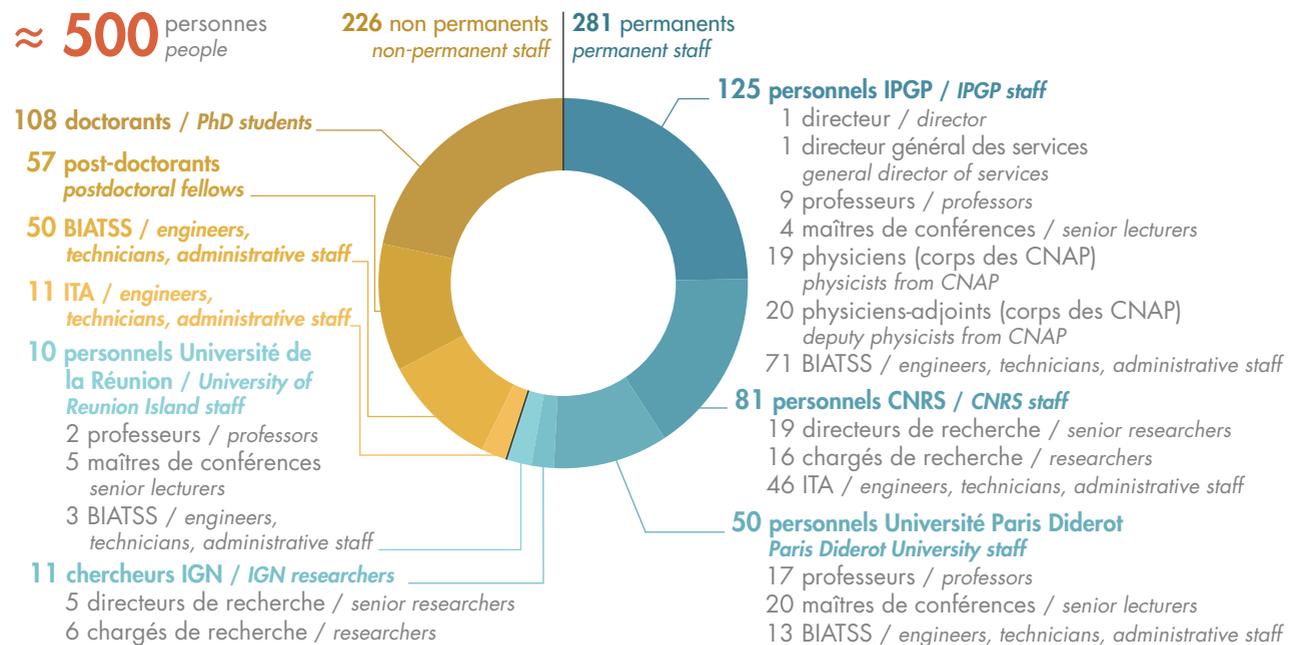


Chiffres clés Key figures

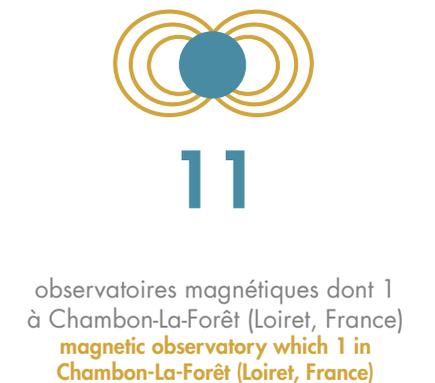
Personnels Staff

L'équipe de direction de l'IPGP se compose du directeur de l'établissement (Marc Chaussidon), du directeur général des services (Antoine Charlot), du directeur adjoint chargé de la recherche et du spatial (Gauthier Hulot), de la directrice adjointe chargée des observatoires (Anne Le Friant), du directeur adjoint chargé de l'enseignement (François Métivier), du directeur adjoint chargé des relations industrielles (Marc Benedetti) et du directeur adjoint chargé des relations internationales (Jean-Paul Montagner). Le dispositif de pilotage de l'IPGP s'appuie notamment sur trois instances : un conseil d'administration qui est garant de la politique générale de l'établissement et vote les comptes ; un conseil scientifique, consulté sur les orientations de la politique de recherche ; un conseil d'unité interne à l'établissement. On compte également deux autres instances : le comité technique et la commission paritaire d'établissement.

The IPGP's management team includes its director (Marc Chaussidon), the general director of services (Antoine Charlot), the deputy director for research and space activities (Gauthier Hulot), the deputy director for observatories (Anne Le Friant), the deputy director for teaching (François Métivier), the deputy director for industrial relations (Marc Benedetti) and the deputy director for international relations (Jean-Paul Montagner). The IPGP's steering system relies in particular on three bodies: an executive board that is the guarantor of the institution's general policy and votes on the accounts; a scientific council, which is consulted regarding the direction of the research policy; and a unit council. Two other bodies exist : the technical committee and the joint committee of establishment.



108 doctorants (≈ 35 par an) dont 35% d'étrangers / PhD students (≈ 35 per year) whose 35% foreigners
50 post-doctorants dont 50% d'étrangers / postdoctoral fellows whose 50% foreigners
40 professeurs invités par an (USA, Europe, Russie...) / visiting professors per year (USA, Europe, Russia...)



Plateformes de recherche Research platforms

BIOGÉOCHIMIE ENVIRONNEMENTALE

Environmental biogeochemistry

Responsable / Team leader : Rémi Losno

COSMOCHIMIE, ASTROPHYSIQUE ET GÉOPHYSIQUE EXPÉRIMENTALE

Cosmochemistry, astrophysics and experimental geophysics

Responsable / Team leader : Manuel Moreira

DYNAMIQUE DES FLUIDES GÉOLOGIQUES

Geological fluid dynamics

Responsable / Team leader : Julien Aubert

GÉOCHIMIE DES ENVELOPPES EXTERNES

External envelopes geochemistry

Responsable / Team leader : Jérôme Gaillardet

GÉOCHIMIE DES ISOTOPES STABLES

Stable isotope geochemistry

Responsable / Team leader : Pierre Cartigny

GÉOMAGNÉTISME

Geomagnetism

Responsable / Team leader : Marianne Greff

GÉOMATÉRIAUX

Geomaterials

Responsable / Team leader : Daniel Neuville

GÉOMICROBIOLOGIE

Geomicrobiology

Responsable / Team leader : Bénédicte Menez

GÉOSCIENCES MARINES

Marine geosciences

Responsable / Team leader : Javier Escartin

GRAVIMÉTRIE ET GÉODÉSIE SPATIALE

Gravimetry and space geodesy

Responsable / Team leader : Michel Diament

PALÉOMAGNÉTISME

Paleomagnetism

Responsable / Team leader : France Lagroix

PHYSIQUE DES SITES NATURELS

Physics of natural sites

Responsable / Team leader : Frédéric Perrier

PLANÉTOLOGIE ET SCIENCES SPATIALES

Planetary and space sciences

Responsable / Team leader : Philippe Lognonné

SISMOLOGIE

Seismology

Responsable / Team leader : Éléonore Stutzmann

SYSTÈMES VOLCANIQUES

Volcanic systems

Responsable / Team leader : Jean-Christophe Komorowski

TECTONIQUE ET MÉCANIQUE DE LA LITHOSPHERE

Lithosphere tectonics and mechanics

Responsable / Team leader : Yann Klinger

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

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

Parallel Computing and Data Analysis Platform for Earth Science (S-CAPAD)

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

Sismomètres "fond de mer" INSU-IPGP (ou OBS pour Ocean-Bottom Seismometer)

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

INSU-IPGP Ocean-Bottom Seismometers (OBS)

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

Plateau d'analyse haute résolution (PARI)

L'IPGP a fédéré 8 de ses équipes autour d'un projet instrumental de grande envergure, dont le but est de doter l'institut d'un plateau technique d'analyse haute résolution de nouvelle génération, constitué d'une chaîne cohérente d'appareils innovants et pour certains pionniers. Le plateau technique se compose d'une suite logique d'instruments, qui constituent une chaîne d'analyse in situ à micro- et nano-échelle.

High-Resolution Analysis Platform (PARI)

The IPGP has gathered 8 of its research teams together on a large-scale instrumental project with the aim of providing the IPGP with a next-generation high-resolution technical analysis platform, made up of a coherent chain of innovative and, in some cases, ground-breaking devices. The technical platform is composed of a logical sequence of instruments that constitute an in situ analysis chain, on a micro and nano scale.

Plateforme de géobiologie Geobiology platform

Experimental Geomicrobiology Laboratory

This laboratory makes it possible to implement imaging techniques derived from molecular biology such as Fluorescent In Situ Hybridisation (FISH), develop microbial cultures, and carry out biomineralisation experiments using model strains.

Microbial Ecology Laboratory

The laboratory has all of the necessary equipment for carrying out studies of microbial diversity on environmental samples, using techniques including Polymerase Chain Reaction (PCR), Denaturing Gel Gradient Electrophoresis (DGGE) and cloning.

Micro-Imaging Platform

A range of microscopes (polarised light microscopy polariser/analyser, epifluorescence and cathodoluminescence) makes it possible to implement both molecular biology techniques such as FISH as well as petrological and mineralogical characterisations, including the study of fluid inclusions (microthermometry stages, camera with infrared detection adapted to opaque minerals).

Laboratoire de géomicrobiologie expérimentale

Il permet de mettre en oeuvre des techniques d'imagerie issues de la biologie moléculaire comme l'hybridation in situ fluorescente (FISH), de mener des cultures microbiennes et de réaliser des expériences de biominéralisation à l'aide de souches modèles.

Laboratoire d'écologie microbienne

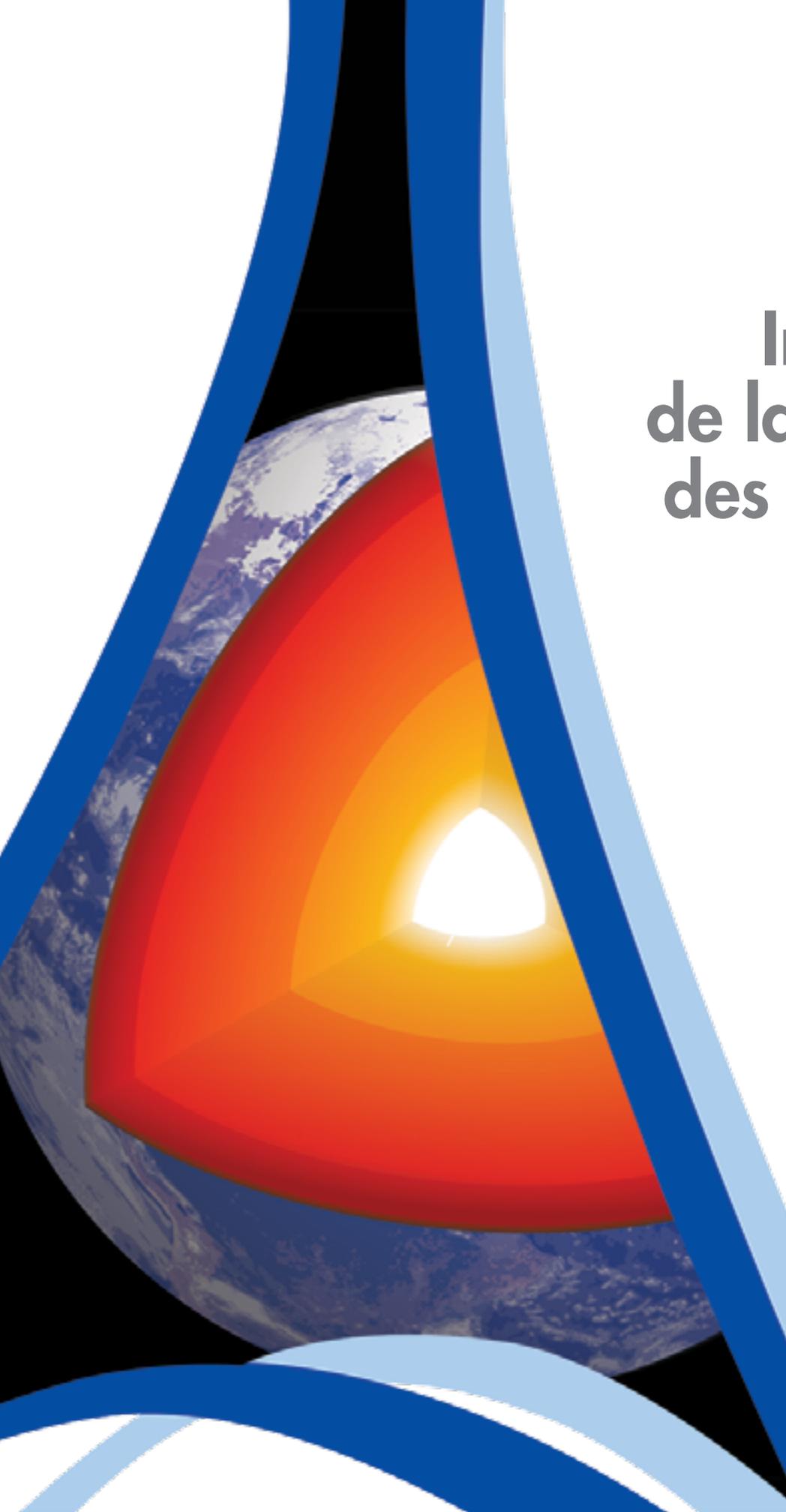
Équipements nécessaires pour mener des études de diversité microbienne sur des échantillons environnementaux et mettant notamment en oeuvre les techniques de Polymerase Chain Reaction (PCR), Denaturing Gel Gradient Electrophoresis (DGGE) et clonages.

Plateforme de microimagerie

Un parc de microscopes (microscopie optique polariseur/analyseur, par épifluorescence et cathodoluminescence) permet de mettre en oeuvre aussi bien des techniques de biologie moléculaire comme le FISH que des caractérisations pétrologiques et minéralogiques dont l'étude des inclusions fluides (platines de microthermométrie, caméra à détection infrarouge adaptée aux minéraux opaques).

Équipes de recherche Research teams





Intérieurs de la Terre et des planètes Earth and planetary interiors

Les différents processus physico-chimiques se produisant dans la Terre profonde sont responsables de multiples phénomènes directement observables en surface, tels que l'activité géologique et le champ magnétique terrestre. Il est fondamental de comprendre la dynamique et la structure interne de notre planète ainsi que de quantifier les échanges masse-énergie entre son noyau métallique, le manteau silicaté et les plaques lithosphériques. Un des atouts de la recherche conduite à l'IPGP est le lien étroit entre des études expérimentales, des modélisations numériques et des observations géophysiques, géochimiques et géologiques. Cette approche multidisciplinaire est essentielle pour interpréter l'état actuel de la Terre interne, tel que révélé par les observations géochimiques et sismologiques, ainsi que par les mesures des champs potentiels de la Terre.

Comprendre l'état actuel de la planète est essentiel pour saisir comment la Terre a évolué au cours des temps géologiques au travers de processus clés tels que la tectonique des plaques, le refroidissement par convection, le mélange thermo-chimique ou encore la différenciation. Dernier point mais non des moindres, l'implication directe de l'IPGP dans des missions spatiales ambitieuses (InSight par exemple, qui fournira les premières données sismiques de Mars), ouvrant la voie au vaste domaine de recherche de la planétologie comparée.

Cinq questions majeures ont été identifiées au sein de ce thème :

- Quels sont les réactions et échanges chimiques se produisant à hautes pression et température entre le noyau et la graine ? Comment est-il possible de contraindre la quantité d'énergie disponible pour le fonctionnement de la géodynamo ?

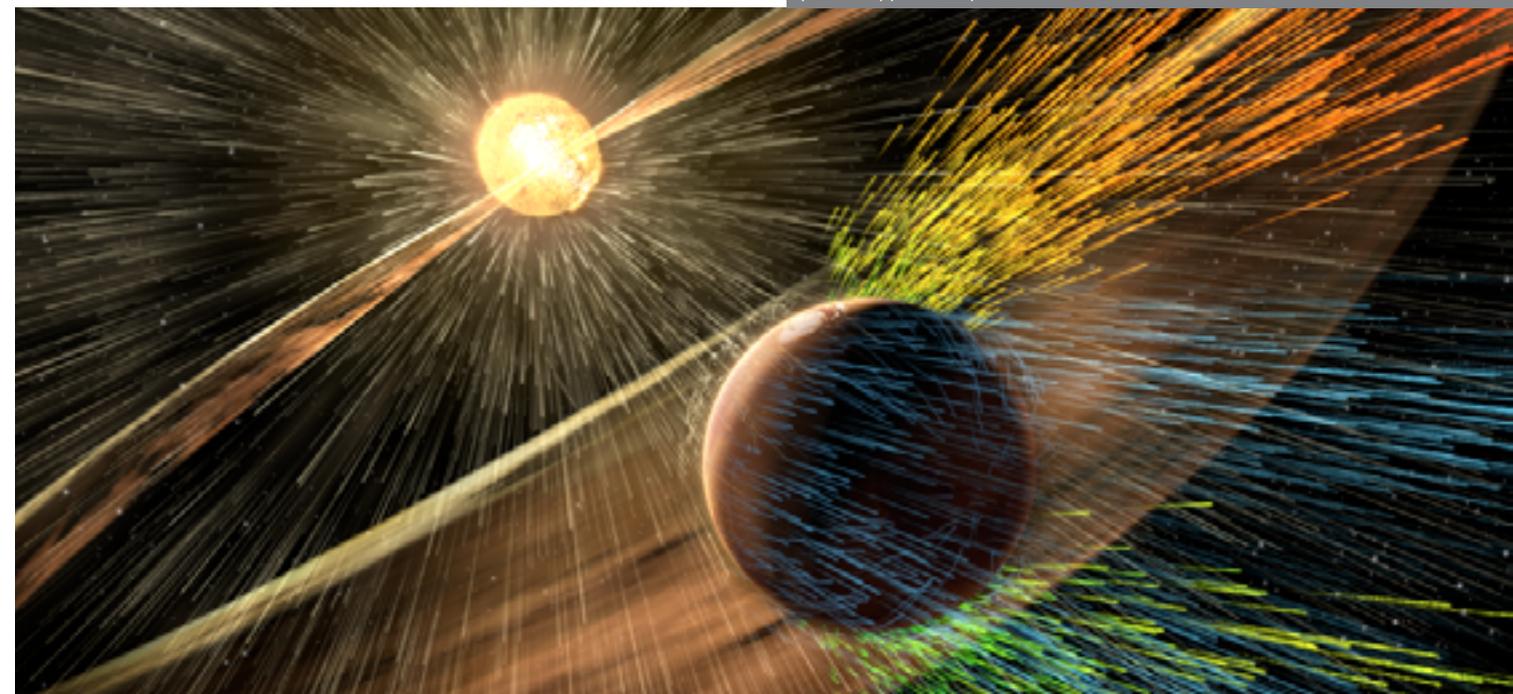
Physico-chemical processes occurring in the Earth's deep interior are responsible for many phenomena that can be observed at the Earth's surface, such as geologic activity and the presence of a magnetic field, just to mention a couple. It is thus fundamental to understand the Earth's internal structure and dynamics, and to quantify the mass-energy exchanges between the metallic core, the silicate mantle, and the lithospheric plates. One of the strengths of the research done within IPGP is that it couples challenging experimental studies and computational modeling to a wide range of observations that include, but are not limited to, geophysics, geochemistry and geology. This integrated approach is essential to interpret the present-day state of the Earth's interior, as revealed by geochemical and seismological observations, and by measurements of the Earth's potential fields.

An understanding of the present-day state is also fundamental to constrain the way our planet evolved over geological times through key processes such as global scale plate motions, convective cooling, thermochemical mixing and differentiation. Last but not least, the direct involvement of IPGP in planetary missions (e.g. InSight, which will provide the first seismic data on Mars), also opens the way to the vast research field of comparative planetology.

Five major questions in this field have been identified:

- Which reactions and chemical exchanges occur at high P-T conditions between inner and outer core? How can one constrain the amount of energy available to power the geodynamo?
- Can one predict present and future variations of the magnetic field by using cutting-edge magneto-hydrodynamic simulations of the Earth's geodynamo?
- How does mantle convection affect long-term mixing of chemical heterogeneities, fluxes of volatiles and the thermal evolution of the planet? Is the mantle ingazing or outgazing?

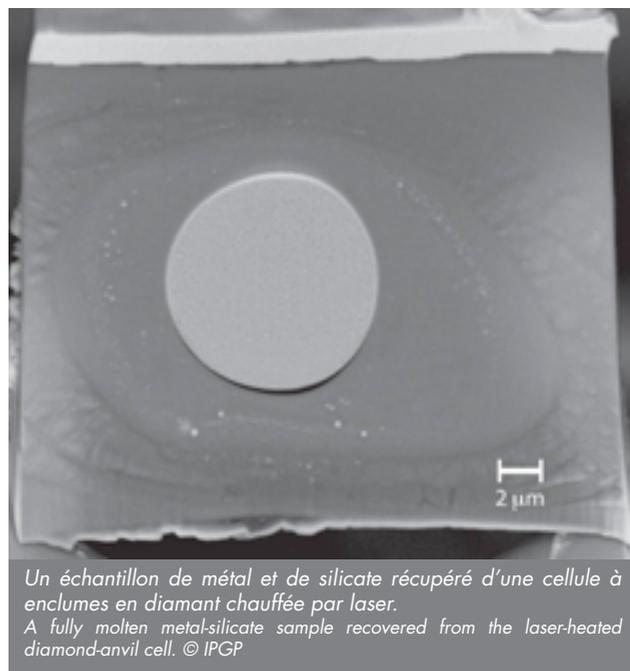
*Vue d'artiste d'une tempête solaire frappant Mars en éliminant les ions de son atmosphère supérieure.
Artist's rendering of a solar storm hitting Mars and stripping ions from the planet's upper atmosphere. © NASA/GSFC*



- Peut-on prédire les variations présentes et futures du champ magnétique à partir de simulations hydrodynamiques de pointe de la géodynamo terrestre ?
- Comment la convection du manteau impacte-t-elle le brassage des hétérogénéités chimiques, des flux d'éléments volatiles et de l'évolution thermique de la planète ? Le manteau absorbe-t-il ou rejette-t-il du gaz ?
- Rift continental, marges passives et dorsales : comment les processus lithosphériques sont-ils reliés au manteau sous-jacent ?
- Que peut-on apprendre des futures observations de la mission spatiale InSight, au-delà de la structure interne de Mars ? ■
- Continental rifting, passive margins and spreading ridges: how are lithospheric processes related to the underlying mantle?
- What can one learn from the future observations of the InSight spatial mission, beyond revealing the internal structure of Mars? ■

FOCUS 1 Une géodynamo ancienne générée par l'expulsion de composants du manteau depuis le noyau terrestre
 An early geodynamo driven by exsolution of mantle components from Earth's core

Les observations paléomagnétiques récentes signalent l'existence d'un champ magnétique sur Terre remontant à au moins 3,45 milliards d'années. Ce champ magnétique est généré dans le noyau de la Terre par des mouvements de convection vigoureux dans sa partie liquide (externe). En revanche, il est alimenté par la croissance de sa partie centrale solide (la graine) qui croît aux dépens du liquide, par simple cristallisation du fait du refroidissement de la Terre et de son noyau depuis 4,56 milliards d'années. En effet, quand le noyau liquide est refroidi en deçà de son point de fusion, il cristallise pour former la graine tout en expulsant des éléments plus légers que le fer vers le noyau liquide, générant ainsi une "flottabilité" compositionnelle. Le problème est que la graine est trop jeune (500 millions à 1 milliard d'années) pour expliquer l'existence d'un champ ancien. La question consiste donc à trouver une autre source d'énergie et d'entropie capable d'opérer dans le noyau liquide en l'absence de graine.



The Earth's present-day geodynamo is primarily driven by compositional buoyancy due to innercore growth. However, the inner core is too young to explain the existence of a magnetic field before one billion years ago. Recent palaeomagnetic observations instead support the existence of a magnetic field already 3.45 billion years ago. It is therefore crucial to find other mechanisms able to sustain an early geodynamo. Theoretical models propose that the exsolution of magnesium oxide from the core could represent an important source of energy.

James Badro and co-authors present the first experimental evidence that, at sufficiently high temperatures, magnesium oxide can indeed dissolve in core-forming metallic melts. The

géodynamo comparée, sinon supérieure, à celle produite par la croissance de la graine actuelle. La génération d'un champ magnétique précoce sans présence de graine devient donc possible, ce qui résout l'énigme posée par l'existence d'un champ magnétique ancien sur Terre. ■

high temperatures, attained during Earth's accretion and the Moon-forming giant impact, would enable large amounts of magnesium in the core. Subsequent core cooling would cause exsolution of buoyant magnesium oxide, a process which would generate enough gravitational energy to power an early geodynamo well before the existence of the inner core. ■

➔ J. Badro, J. Siebert & F. Nimmo, "Corrigendum: An early geodynamo driven by exsolution of mantle components from Earth's core", *Nature* 536, 326–328 (2016), doi:10.1038/nature18594

FOCUS 2 Analyse et prédiction de la géodynamo
 Analysis and forecast of the geodynamo

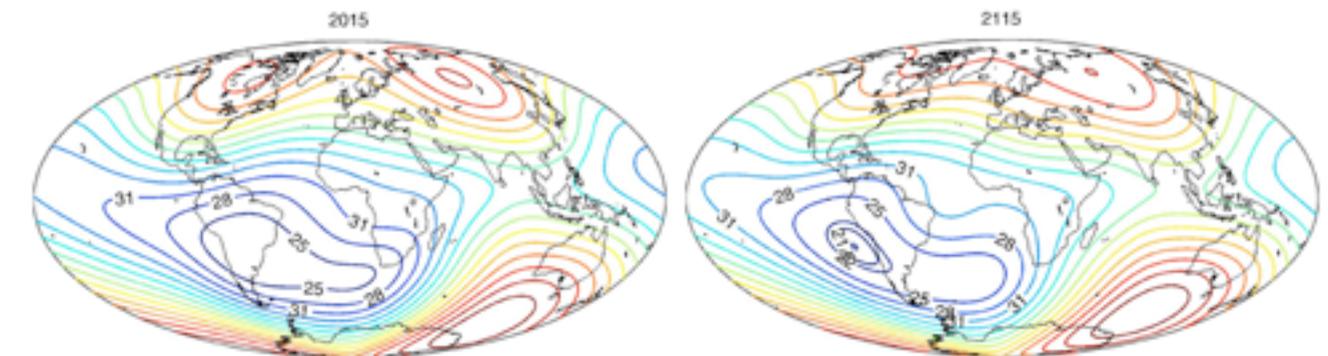
Pourquoi l'intensité du champ magnétique terrestre a-t-elle décliné de 10% entre 1840 et nos jours ? L'anomalie Sud-Atlantique de ce champ, au dessus de laquelle le matériel embarqué dans les satellites subit le plus grand nombre d'avaries, va-t-elle encore se creuser dans le siècle à venir ? Pour répondre à ces questions, des chercheurs de l'IPGP ont réalisé des progrès notables dans la modélisation opérationnelle de la géodynamo.

Why has the intensity of Earth's magnetic field decreased by 10% between 1840 and the present day? Will the South Atlantic geomagnetic anomaly (a zone of problematic flight for low Earth orbiting satellites) further deepen in the coming century? To answer these questions, IPGP researchers have realised important advances in operational modelling of the geodynamo.

Le champ magnétique de la Terre interagit fortement avec les activités technologiques humaines. Ce champ trouve sa source dans le lent refroidissement de l'intérieur de notre planète, qui crée des mouvements de convection dans son noyau fluide. Les activités de simulation numérique de cette géodynamo sont très développées à l'IPGP et ont permis de mieux comprendre les fondamentaux de ce mécanisme. Ces simulations sont maintenant suffisamment avancées pour reproduire l'essentiel des caractéristiques de grande échelle et les variations centennales du champ magnétique.

The Earth's magnetic field strongly interacts with human technological activities. This field is generated by vigorous convective motion caused by slow cooling in the liquid core of the planet. Numerical simulations of the geodynamo are highly developed at IPGP, where several advances have been reported in the understanding of this mechanism. Such simulations are now sufficiently advanced to reproduce the main large-scale characteristic features and the secular variations of the magnetic field.

In order to perform operational modelling of the geodynamo, it is important to develop data assimilation techniques in order to integrate geomagnetic data (as acquired in IPGP magnetic observatories and by satellite missions such as Swarm, in which IPGP is deeply involved) in numerical simulations. Through such techniques, it is possible to statistically



Courbes d'intensité à la surface de la Terre du champ magnétique observé en 2015, et prédit en 2015 à partir de l'assimilation de données. Selon cette prédiction, l'anomalie de basse intensité de l'Atlantique Sud (contours en bleu) s'intensifiera et dérivera vers l'Ouest dans le siècle prochain.
 Isocontours of magnetic field intensity at Earth's surface, as observed in 2015, and forecast in 2015 by data assimilation. This prediction reveals that the South Atlantic geomagnetic anomaly of low intensity (blue contours) will deepen and drift westwards in the coming century. © Aubert

Afin d'entrer dans une phase opérationnelle, il importe de développer des techniques d'assimilation des données géomagnétiques (telles qu'acquises par les observatoires et les missions satellitaires comme Swarm, dans laquelle l'IPGP est fortement impliqué) dans ces simulations numériques. Par ces techniques et ces observations, on peut réaliser des inférences statistiques de la structure dynamique interne du noyau et faire évoluer dans le futur un modèle calibré par les données afin de réaliser des prédictions. Les chercheurs de l'IPGP ont développé des techniques basées sur le filtre de Kalman d'ensemble, très utilisé en météorologie et en océanographie. Ils ont pu mettre en évidence les écoulements à grande échelle qui ont gouverné la décroissance du dipôle magnétique terrestre depuis 170 ans. La prédiction pour l'évolution de la géodynamo dans le prochain siècle révèle un creusement de l'anomalie Sud-Atlantique de faible intensité du champ, qui devrait élargir la zone problématique pour le vol des satellites de basse altitude. ■

infer the internal dynamical structure of the core from surface observations, and to perform forecasts for the future evolution of the system. IGP researchers have developed techniques based on ensemble Kalman filter, akin to those widely used in numerical weather prediction and oceanography. These could highlight the large-scale flows that have governed the decrease of Earth's magnetic dipole since 170 years. A forecast for the evolution of the geodynamo in the coming century reveals that the South Atlantic anomaly of low magnetic intensity will further deepen, and this will increase the problematic flight zone for satellites at low altitudes. ■

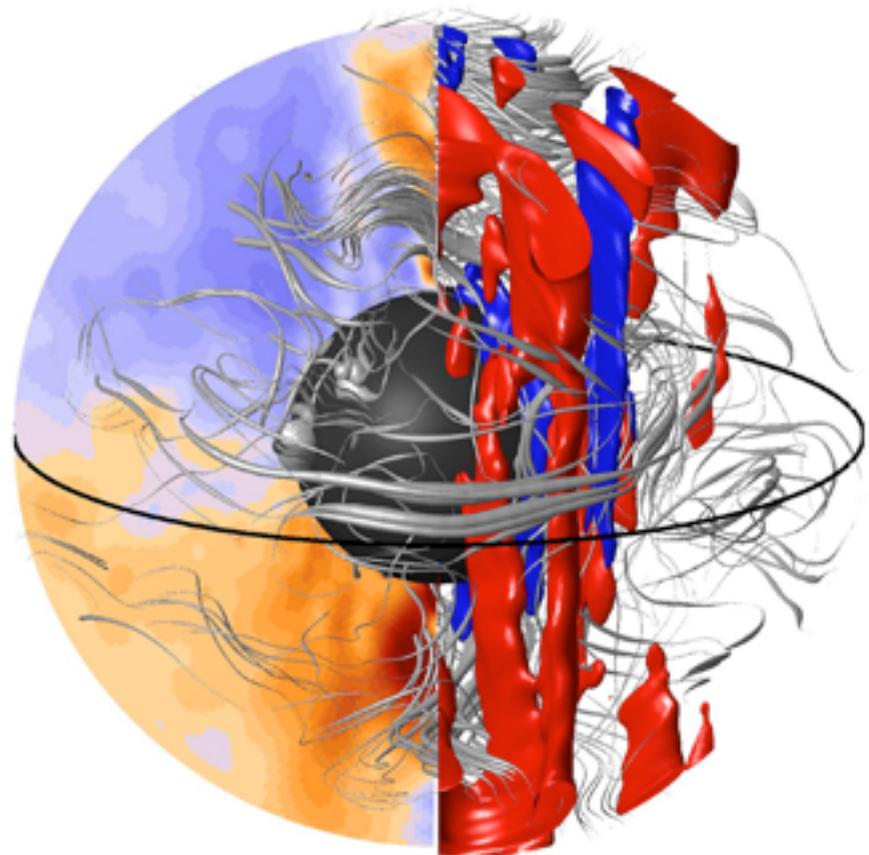


Image de l'état interne de la géodynamo en 2015, estimée par assimilation de données à partir des observations satellitaires de surface et d'un modèle numérique dynamique. La coupe en couleur représente le champ magnétique radial (vers l'extérieur en orange). Les lignes grises représentent les lignes de force du champ magnétique à l'intérieur du noyau. Les structures rouges et bleues sont les colonnes de convection qui agitent le noyau.

Image of the internal dynamical structure of the geodynamo in 2015, as inferred by data assimilation from satellite geomagnetic observations and a numerical simulation of the geodynamo. The meridional cut represents the radial magnetic field (orange is outwards). Grey tubes represent magnetic field lines inside the core. Red and blue structures are isosurfaces of the cylindrical radial velocity, imaging convective motions in the core. © Finlay, Aubert, Gillet

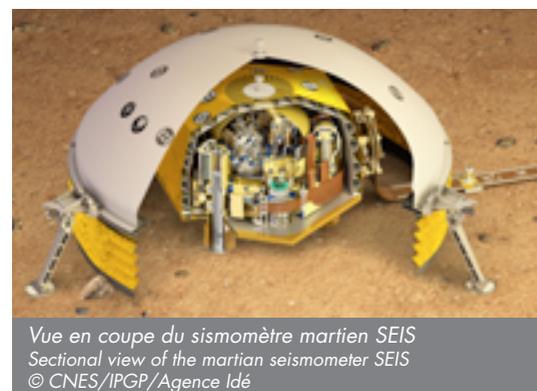
➔ J. Aubert, "Geomagnetic forecasts driven by thermal wind dynamics in Earth's core", *Geophys. J. Int.* 203, 1738-1751 (2015), doi: 10.1093/gji/ggv394

C. C. Finlay, J. Aubert & N. Gillet, "Gyre-driven decay of Earth's magnetic dipole", *Nature Communications* 7, 10422 (2016), doi: 10.1038/ncomms10422

A. Fournier, L. NERGER & J. Aubert, "An ensemble Kalman filter for the time-dependent analysis of the geomagnetic field", *Geochem. Geophys. Geosyst.* 14 (2013), doi: 10.1002/ggge20252

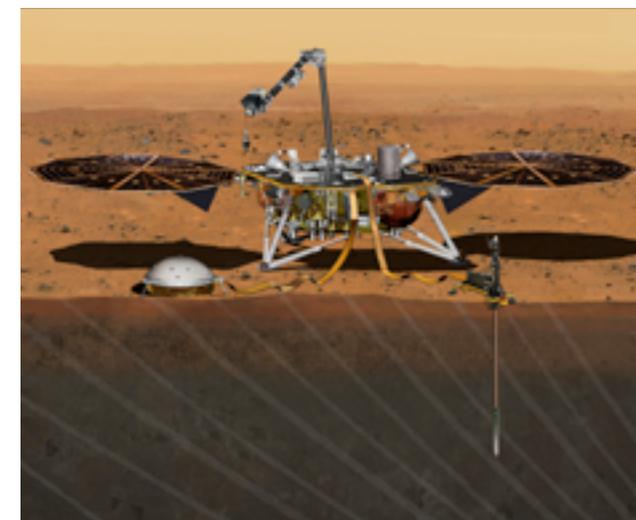
FOCUS 3 Futurs produits du service de structure interne martienne pour la mission InSight vers Mars Planned products of the Mars Structure Service (MSS) for the InSight mission to Mars

En 2018, l'atterrisseur InSight déposera un ensemble d'instruments géophysiques sur Mars, en particulier des sismomètres qui seront installés à la surface (SEIS - *Seismic Experiment for Interior Structure* : Expérimentation Sismique pour la Structure Interne). Les analyses scientifiques seront réalisées par deux services, le Service de Structure Interne Martienne (MSS - *Mars Structure Service*) et le Service des Séismes Martiens (MQS - *MarsQuake Service*), qui seront respectivement responsables de la génération des premiers modèles sismiques de structure interne et du catalogue de sismicité de la planète. Le MSS générera ces modèles avant la mission, pendant, puis les livrera au Centre de Données Planétaires de la NASA (PDS). Ainsi, en amont de la mission, un ensemble de modèles de structure interne martienne ont été générés, basés sur des compositions minéralogiques et des profils thermiques à priori. Ces modèles seront conçus grâce aux ondes de surface et aux ondes de volumes produites par des impacts, indépendamment des connaissances à priori. Les modèles suivants intégreront des inversions simultanées des sources sismiques et de la structure interne. Tous ces modèles résulteront des inversions bayésiennes, afin de décrire les paramètres de structure interne d'une façon probabiliste. La structure superficielle sera caractérisée grâce aux signaux sismiques créés lors de la pénétration de la sonde de flux de chaleur, ainsi que par la mesure de l'ellipticité des ondes de surface. La structure de la croûte sera elle contrainte par la technique dite de fonction récepteur et par l'ellipticité des ondes de Rayleigh large bande. La structure plus profonde sera enfin déterminée par les ondes de volumes interagissant avec le noyau, qui devrait à priori avoir des amplitudes dépassant le bruit micro-sismique. Pour les plus forts séismes, les modes propres devraient enfin être observables et fourniront des structures 1D moyennes de Mars, en particulier lorsqu'ils seront combinés aux données de l'expérience de Radio-Science RISE et aux observations orbitales. ■



Vue en coupe du sismomètre martien SEIS
Sectional view of the martian seismometer SEIS
© CNES/IPGP/Agence Idé

The InSight lander will deliver geophysical instruments to Mars in 2018, including seismometers installed directly on the surface (*Seismic Experiment for Interior Structure, SEIS*). Routine operations will be split into two services, the Mars Structure Service (MSS) and Marsquake Service (MQS), which will be responsible, respectively, for defining the structure models and seismicity catalogs from the mission. The MSS will deliver a series of products before the landing, during the operations, and finally to the Planetary Data System (PDS) archive. Prior to the mission, we assembled a suite of a priori models of Mars, based on estimates of bulk composition and thermal profiles. Initial models during the mission will rely on modeling surface waves and impact-generated body waves independent of prior knowledge of structure. Later modeling will include simultaneous inversion of seismic observations for source and structural parameters. We use Bayesian inversion techniques to obtain robust probability distribution functions of interior structure parameters. Shallow structure will be characterized using the hammering of the heatflow probe mole, as well as measurements of surface wave ellipticity. Crustal scale structure will be constrained by measurements of receiver function and broadband Rayleigh wave ellipticity measurements. Core interacting body wave phases should be observable above modeled martian noise levels, allowing us to constrain deep structure. Normal modes of Mars should also be observable and can be used to estimate the globally averaged 1D structure, while combination with results from the InSight radio science mission and orbital observations will allow for constraint of deeper structure. ■



Vue d'artiste de la sonde InSight sur Mars
Artist's concept of InSight Mars lander © JPL/NASA

➔ M. P. Panning, P. Lognonné, W. B. Banerdt, R. Garcia, M. Golombek et al., "Planned Products of the Mars Structure Service for the InSight Mission to Mars", *Space Sciences review* (2016), doi: 10.1007/s11214-016-0317-5

Risques naturels

Natural hazards

Les risques naturels (tremblements de terre, éruptions volcaniques, tsunamis, glissements de terrain, érosion côtière, changements du niveau de la mer, éruptions solaires majeures...) peuvent potentiellement affecter des millions de gens et impacter l'économie de pays tout entiers. Thème de recherche central des sciences de la Terre, les avancées réalisées aussi bien sur les causes et les conséquences de ces phénomènes naturels que sur les techniques de surveillance et les analyses de données profitent de manière rapide et notable à la société. En dépit de récents progrès permis par le développement de nouvelles techniques et simulations, les géologues ne sont pas encore en mesure de prédire précisément le moment, le lieu et la magnitude des tremblements de terre.

Les volcans, même lorsqu'ils sont surveillés en permanence, restent des systèmes particulièrement mystérieux. Notamment les éruptions siliciques, dont on ne peut prévoir ni le déclenchement, ni l'intensité, ni la durée. Aucun des pays dits scientifiquement avancés ne peut se permettre de prendre du retard dans ce domaine, d'une part afin de maintenir son statut sur la scène internationale et tenir ses engagements vis à vis de ses concitoyens, d'autre part parce qu'une catastrophe naturelle localisée sur un territoire affectera probablement les pays voisins, si ce n'est la planète tout entière. Par ailleurs, la recherche dans ce domaine s'appuie massivement sur les réseaux d'observation multiparamètres permanents ou semi-permanents situés dans les régions exposées aux catastrophes, où les chercheurs et ingénieurs restent proches des populations impactées, permettant ainsi d'installer une relation de confiance durable.

D'une manière générale, les risques naturels sont le résultat de processus géologiques à grande échelle qui évoluent sur des intervalles de temps particulièrement longs et qui concernent la quasi-totalité des spécialités des sciences de la Terre. Compte tenu de leur impact potentiel sur les infrastructures industrielles et sociales aussi bien que sur la santé et le développement durable, leur étude ouvre logiquement la voie à des recherches interdisciplinaires comprenant la géographie, l'économie, la santé ou encore les sciences humaines et sociales.



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

Natural Hazards (earthquakes, volcanic eruptions, tsunamis, landslides, coastal erosion, sea level changes, major space weather events...) can potentially affect millions of people and damage the economy of whole countries. They are a central research domain in the Earth sciences, where advances on academic research on the causes and consequences of natural phenomena as well as monitoring techniques and effective data analysis bring rapid and major benefits to the society. Despite much recent progress due to the development of techniques and simulations, geologists are still unable to predict precisely when and where an earthquake will happen and what its magnitude will be.

Volcanoes, even when constantly monitored, remain also very enigmatic systems. In particular, forecasting of the timing and intensity of silicic eruptions remain out of reach. No scientifically developed country can afford to lag behind the others in this domain, in part for the sake of its international standing and responsibility towards its citizens and in part because natural disasters originating in one country are likely to affect neighbouring ones and can have impacts on a global scale. Furthermore, research in this domain heavily relies on permanent or semi-permanent multiparameter monitoring networks located in disaster-prone regions, where researchers and engineers remain close to potentially affected populations, which promotes trust in mitigation programs built and maintained on a long-term basis.

From a general perspective, natural hazards are the end-result of large-scale geological processes that evolve over long time intervals and touch on almost all subdisciplines of the Earth Sciences in one way or another. Because of their potential impact on the industrial and social infrastructures as well as on health and sustainability issues, their study offers evident avenues for cross-disciplinary researches linked to Geography, Economy, Health, Social Sciences and Humanities.

Major challenges in the field of natural hazards have been identified:

- To make the paradigms relating major natural hazards to plate tectonics evolve (1) by developing new geophysical instruments and techniques to obtain a 3D multi-techniques characterisation and high frequency monitoring of the activity of natural systems, using innovative techniques such as muon tomography, correlation of optical images, sea-bottom optical seismometers, and/or combining geophysical and geochemical data,

Dans le domaine des risques naturels, les défis majeurs suivants ont été retenus :

- Redéfinir les paradigmes liant les risques naturels majeurs aux concepts de la tectonique des plaques (1) en développant de nouveaux instruments et techniques en vue d'obtenir une caractérisation 3D multi-techniques et un contrôle haute fréquence de l'activité des systèmes naturels, en utilisant des techniques innovantes telles que la tomographie à muons, la corrélation d'images optiques, des sismomètres optiques fond-de-mer et/ou en combinant des données géophysiques et géochimiques, (2) en collectant les enregistrements géologiques originaux de l'activité passée, en particulier en profitant des études réalisées à la fois sur terre et en mer.
- Analyser et modéliser le lien entre les systèmes de plomberie magmatique souterrains et l'activité volcanique de surface, tel que les conditions menant à une éruption plutôt qu'à une intrusion magmatique, ou encore l'interprétation de l'activité d'un système hydrothermal en matière de potentiel éruptif.
- Caractériser et modéliser des phénomènes longue période (tels que les lents tremblements de terre au Chili ou les séismes et trémors longue période au Kamchatka) en s'appuyant sur des paramètres contraints par les développements de techniques numériques modernes à l'IPGP pour traiter des grands ensembles de données, ainsi que sur des modèles quantitatifs physiques (plutôt que sur les modèles qualitatifs utilisés le plus couramment).
- Élargir l'influence des résultats de la recherche fondamentale en interagissant avec les sciences humaines et sociales, en particulier dans le cadre de l'amélioration de la gestion des catastrophes et risques naturels, en tenant compte de l'impact du changement climatique sur le nombre et l'intensité des phénomènes naturels (cyclones, glissements de terrain...) ainsi que des processus associés ou réagissant en chaîne (tels que le déclenchement d'une activité volcanique à la suite d'événements climatiques extrêmes ou celui d'une éruption suite à des séismes lointains de forte magnitude). ■

(2) by collecting original geological records of their past activity, in particular by taking advantage of coupled on land and at sea studies.

• To decipher and model the coupling between underground magmatic plumbing systems and surface volcanic activity, e.g. the condition leading to an eruption rather than a magmatic intrusion, or the interpretation of the activity of a hydrothermal system in terms of eruptive potential.

• To characterize and model long period phenomena (such as slow earthquakes in Chile and LP earthquakes and tremors in Kamchatka) based on the constraints obtained thanks to the new numerical methods developed at IPGP to process large-data sets, and on quantitative physical models (rather than presently used qualitative models).

• To widen the impact of the results of fundamental research through exchanges with Humanities and Social Sciences, in particular to improve the management of natural risks and natural catastrophes, including the study of the impact of global change on the rate and intensity of natural phenomena (cyclones, landslides...) and coupled or chain-link processes (e.g. forcing of volcanic activity by extreme climatic events; triggering of eruptions by large magnitude distant earthquakes). ■

FOCUS 1 Détection d'un signal de gravité avant l'arrivée des ondes sismiques lors du tremblement de terre de Tohoku-Oki en 2011

Detection of a gravity signal before the arrival of seismic waves in the 2011 Tohoku-Oki earthquake

Une modification du champ gravitationnel terrestre produite pendant une rupture sismique vient d'être pour la première fois détectée pendant le tremblement de terre de Tohoku-Oki, qui s'est produit le 11 mars 2011 de magnitude 9.0. Ce travail est le fruit d'une collaboration internationale comprenant des chercheurs de l'institut de physique du globe de Paris (IPGP, CNRS/INSU, UPD, USPC, IUF) et du laboratoire Astroparticule et cosmologie (APC, CNRS /IN2P3, UPD, USPC). Cette nouvelle possibilité de détecter un changement de gravité avant l'arrivée des ondes sismiques pourrait contribuer à terme à améliorer les systèmes d'alerte précoce aux tremblements de terre.

A modification of the earth's gravitational field produced during a seismic rupture was first detected during the earthquake of Tohoku-Oki, which occurred on March 11th, 2011 with magnitude 9.0. This work is the result of an international collaboration involving researchers from the institute du globe de Paris (IPGP, CNRS / INSU, UPD, USPC) and the Astroparticle and Cosmology Laboratory (APC, CNRS / IN2P3, UPD, USPC). This new possibility of detecting a gravity change before the arrival of seismic waves could ultimately contribute to improve earthquakes early warning systems.

In addition to the generation of seismic waves propagating from the source throughout the surrounding environment, earthquakes are associated with a significant mass redistribution

En plus de générer des ondes sismiques qui se propagent à partir de la source dans tout le milieu environnant, les tremblements de terre s'accompagnent d'une redistribution de masse importante entraînant des modifications significatives du champ gravitationnel terrestre. Alors que les ondes sismiques se propagent dans le milieu à une vitesse de quelques kilomètres par seconde, le champ gravitationnel est quant à lui perturbé de manière quasi instantanée (à la vitesse de la lumière). Une modification du champ gravitationnel avait déjà été détectée longtemps après l'occurrence d'un séisme alors que le champ avait atteint un nouvel équilibre, mais jamais encore pendant la rupture, au moment de la perturbation du champ et avant l'arrivée des ondes sismiques au détecteur.

Dans l'espoir de détecter un tel signal, une équipe internationale comprenant des chercheurs de l'IPGP et de l'APC s'est intéressée au méga-séisme de magnitude 9.0 de Tohoku-Oki au Japon, qui s'est produit le 11 mars 2011. Les chercheurs ont réalisé une analyse statistique des données enregistrées par le gravimètre supraconducteur de Kamioka au Japon, situé à environ 500 km de l'épicentre, complétées par des données de sismomètres large-bande du réseau japonais F-net. Ils ont ainsi pu mettre en évidence un signal de gravité lié à la rupture sismique, avec une signification statistique supérieure à 99% et en accord avec un modèle analytique du signal de gravité.

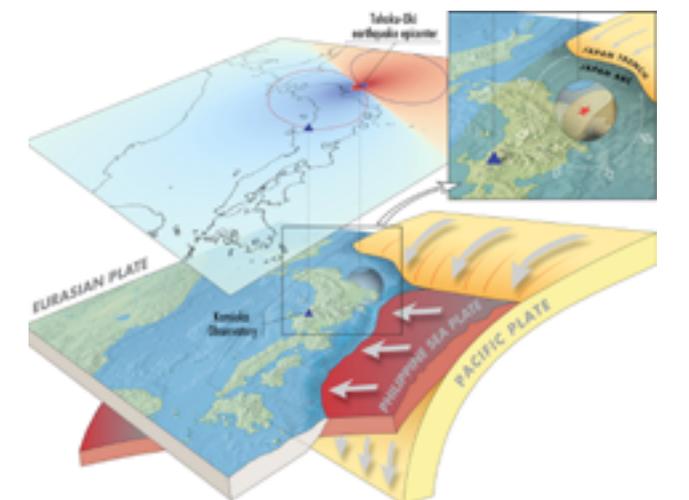
Cette découverte ouvre de nouvelles perspectives. Ce signal pourrait en effet être utilisé par les systèmes d'alerte rapide aux tremblements de terre, dits EEWS (earthquake early warning system). Actuellement, les EEWS reposent sur la détection des ondes sismiques de compression P, qui arrivent avant les ondes de cisaillement S très destructrices. Ce décalage des temps d'arrivée (de seulement quelques secondes à proximité de la rupture) est exploité pour alerter la population locale et protéger les équipements et infrastructures à risque (coupure de l'eau, de l'électricité et du gaz, arrêt des trains, des ascenseurs...). Le signal du champ de gravité concomitant à la rupture pourrait permettre de gagner de précieuses secondes avant l'arrivée des ondes sismiques P. Il pourrait également permettre de déterminer la magnitude exacte d'un séisme dès la fin de la rupture, alors que les méthodes actuelles prennent plusieurs dizaines de minutes.

Toutefois, l'implémentation d'un système d'alerte utilisant la gravité nécessitera le développement de nouveaux instruments capables de mesurer le champ de gravité terrestre de manière beaucoup plus précise que les instruments actuels. De tels instruments pourraient venir de la physique fondamentale. ■

that generates significant changes in the earth's gravitational field. While seismic waves propagate in the medium at a rate of a few kilometers per second, the gravitational field is modified almost instantaneously (at the speed of light). A modification of the gravitational field was already detected long after the occurrence of an earthquake when the field had reached a new equilibrium, but never during the rupture, at the time of the disturbance of the field, before the arrival of the seismic waves to the detector.

In the hope of detecting such a signal, an international team of IPGP and APC researchers focused on the Tohoku-Oki magnitude 9.0 mega-earthquake in Japan which occurred on March 11th 2011. The researchers carried out a statistical analysis of the data recorded by the Kamioka superconducting gravimeter in Japan, located about 500 km away from the epicenter, supplemented by broadband seismometer data from the Japanese F-net network. They have thus been able to demonstrate a signal of gravity related to the seismic rupture, with a statistical significance greater than 99% and in agreement with an analytical model of the gravity signal.

This discovery opens new perspectives. This signal could indeed be used by earthquake early warning systems (EEWS). At present, the EEWS relies on the detection of compressional seismic P waves, which arrive before the very destructive shear S waves. This delay in the arrival time (only a few seconds in the vicinity of the rupture) is exploited to alert the local population and to protect equipments and infrastructures (cutting off water, electricity and gas, trains, lifts ...). The signal of the gravity field concomitant with the rupture



Représentation de la rupture lors du tremblement de terre de Tohoku-Oki, dont l'hypocentre (étoile rouge) est représenté sur l'interface de subduction. Sont représentés 1) la propagation des ondes sismiques dans la Terre 10 secondes après l'initiation de la rupture, délimitée par la sphère (zoom en haut à droite) et 2) la distribution de l'anomalie de gravité (carte superposée à la topographie, en haut à gauche).
Representation of the rupture of the Tohoku-Oki earthquake, whose hypocenter (red star) is represented on the subduction interface. 1) the propagation of the seismic waves in the Earth 10 seconds after the initiation of the rupture, delimited by the sphere (zoom in the upper right) and 2) the distribution of the gravity anomaly (map superimposed on the topography, top left). © IPGP

could allow to gain precious seconds before the arrival of the seismic P waves. It could also make it possible to determine the exact magnitude of an earthquake at the end of the rupture, whereas the conventional methods take several tens of minutes.

However, the implementation of a gravity alert system will require the development of new instruments capable of measuring the earth's gravity field much more accurately than current instruments. Such instruments might come from fundamental physics. ■



J-P. Montagner, K. Juhel, M. Barsuglia, J-P. Ampuero, E. Chassande-Mottin, J. Harms, B. Whiting, P. Bernard, E. Clévéde & P. Lognonné, "Prompt gravity signal induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake", *Nature Communications* 7, 13349 (2016), doi:10.1038/ncomms13349

FOCUS 2 Éruption du volcan Samalas en 1257 The 1257 CE eruption of Samalas volcano

Selon les enregistrements retrouvés dans les carottes glaciaires et les dépôts de cendres, une des plus grandes éruptions de la période historique et de ces 7000 dernières années a eu lieu en 1257. Cependant, la source de cette "éruption mystère" demeurait inconnue... En se basant sur un corpus solide de données géochimiques, stratigraphiques, de volcanologie physique, de datation ¹⁴C et de chroniques médiévales, cette étude, menée par une équipe internationale et pluridisciplinaire, a pu déterminer que la source de cette éruption est le volcan Samalas, dans le complexe volcanique du Mont Rinjani, sur l'île Lombok, en Indonésie. Ces résultats résolvent une énigme qui a interrogé les glaciologues, les volcanologues et les climatologues pendant plus de 30 ans. L'identification de ce volcan permet aussi de supposer un Pompéi oublié de l'extrême orient...

Les traces d'éruptions majeures, telles que celles du Vésuve (79 après JC), Huaynaputina (1600), Tambora (1815) et Krakatau (1883) ont été identifiées dans des carottes de glace. Mais de nombreuses autres éruptions ont également été mises en évidence dans les archives glaciaires sans que leurs sources ne puissent être associées à un volcan particulier. La plus extraordinaire de ces "éruptions mystérieuses" a eu lieu autour de 1258 après JC, probablement dans une région tropicale. Dans les carottes glaciaires GISP2 du Groenland, la concentration en aérosols sulfatés associée à cette éruption est la plus importante des 7000 dernières années. Ceci a conduit plusieurs chercheurs à la considérer responsable de l'un des plus grands événements d'émission de gaz soufrés volcaniques dans la stratosphère depuis 7000 ans et le plus important de l'Histoire depuis l'éruption du Santorin en Grèce il y a plus de 3600 ans. Les données de dendrochronologie, les chroniques médiévales et les modélisations numériques confirment l'impact global sur l'atmosphère et le climat lié à cette éruption mystérieuse. Depuis 30 ans, l'identification du volcan responsable de l'éruption mystérieuse du 13^e siècle a échappé à la communauté scientifique des glaciologues, volcanologues, et climatologues. El Chichon (Mexique) et Quilotoa (Équateur)

Volcanism has strongly influenced the evolution of the atmosphere, hydrosphere, climate and life over geological history. It is also argued that over the past few hundred thousand of years, volcanic eruptions have had global impacts on the climate and environment, and consequently on human society, as a result of the large quantities of ash and gases they can inject into the stratosphere. Sulphur gases oxidise to form sulphate aerosols that can, in the case of a large explosive eruption of a tropical volcano, veil the entire planet with a fine dust that takes several years to disperse. Some of this fine particulate can eventually settle out in the polar regions, where it may be preserved in the ice for millennia.

Over the last three decades, ice core records have offered a unique opportunity to study past volcanism and its environmental impacts. Glaciochemical records have yielded estimates of volcanic sulphate aerosol loadings in the stratosphere associated with large volcanic eruptions, and have also been used to gauge the Earth system response of volcanism. These high-resolution records have also revealed many significant eruptions that remain otherwise unknown. One of the largest of these "mystery eruptions" has an ice core sulphate deposit dated to 1258/1259 CE, pointing to an eruption in 1257 or 1258 CE. Estimates of its stratospheric sulphate load are around eight- and two-times greater than those of Krakatau in 1883 CE and Tambora in 1815 CE, respectively, ranking it among the most significant volcanic events of the Common Era. Tree-ring, historical, and archaeological records attest to substantial climatic impacts, which were most pronounced in the northern hemisphere in 1258 CE. Medieval chronicles highlight an unseasonable cold summer with incessant rains, associated with devastating floods and poor harvests. The interhemispheric transport of tephra and sulphate suggests a tropical eruption. Until 2013, however, identification of the volcano responsible for the medieval "year without summer" remained uncertain, despite more than 30 years of investigations. Various candidates have been implicated, including Okataina (New Zealand), El Chichón (Mexico), and Quilotoa volcano (Ecuador), but none of these presents a strong case with respect to eruption magnitude, geochemistry, and timing.

In 2013, an interdisciplinary team of researchers from France, Indonesia and the UK, cross-correlated Indonesian and European chronicles with radiocarbon dating, stratigraphy, geomorphology, physical volcanology and geochemistry to identify the source of the 'mystery eruption' as Samalas volcano, part of the Rinjani volcanic complex on

ont ainsi successivement été écartés, sur la base d'arguments géochimiques notamment.

Caldera du Samalas, île Lombok, Indonésie.
Samalas caldera, Lombok island, Indonesia. © IPGP

L'identification d'une nouvelle source volcanique crédible suite à ces années de recherches infructueuses constitue la principale conclusion de la présente étude. La constitution d'une équipe internationale pluridisciplinaire de chercheurs, coordonnée par le laboratoire de géographie physique à Meudon (Université Paris 1 / Institut National Écologie et Environnement - INEE du CNRS) à laquelle ont participé, entre autres, des scientifiques de l'institut de physique du globe de Paris (INSU - CNRS UMR 7154, Sorbonne Paris-Cité), a permis la mise en place d'un corpus de preuves solides attestant de la localisation de ce volcan mystérieux en Indonésie. En croisant des données stratigraphiques (cartes de distribution des dépôts), géomorphologiques (reconstitution en 3D de l'ancien volcan effondré), de volcanologie physique (volume et flux de masse de l'éruption, hauteur de la colonne éruptive), géochimiques (comparaison de la composition des particules vitreuses dans les cendres du volcan avec celles des particules vitreuses retrouvées dans les glaces polaires et associées au pic de concentration en aérosols sulfatés), les datations ¹⁴C et une chronique médiévale en Javanais ancien (Babad Lombok) qui a révélé le nom de ce volcan, les chercheurs ont identifié le Samalas, situé dans le complexe volcanique du Rinjani, sur l'île de Lombok en Indonésie, comme source de l'éruption mystérieuse.

Les résultats montrent que cette éruption aurait émis environ 40 ± 3 km³ DRE (équivalent roche dense ou magma non vésiculé) de produits volcaniques, volume qui dépasse les 30-33 km³ DRE calculés pour l'éruption du volcan voisin Tambora en 1815, jusqu'alors considérée comme la plus forte des trois derniers millénaires. L'éruption de 1257 a engendré la mise en place de trois unités principales de retombées de ponce qui recouvrent une vaste région (> 120 km de distance) et d'épaisses coulées de ponces qui atteignent une épaisseur de 30 m à plus de 25 km de distance de la caldera. Avec une magnitude de 7, une intensité de 12 et un panache volcanique qui a atteint plus de 43 ± 9 km de hauteur, l'éruption ultraplinienne du Samalas est l'une des plus violentes de l'Holocène. Elle a provoqué l'effondrement des volcans Samalas et Rinjani, formant une vaste caldera (cratère d'effondrement) de 6 x 8,5 km de largeur et d'au moins 800 m de profondeur, aujourd'hui occupée par un lac (photo).

Les implications de cette découverte concernent un vaste panel de thématiques scientifiques allant des sciences de la Terre et du climat aux sciences sociales. À l'échelle globale, les modèles de reconstitution des perturbations climatiques liées aux éruptions explosives de grande magnitude et leur impact sociétal pourront être affinés, notamment en Europe. À une échelle plus régionale ou locale, la recherche de l'ancienne capitale du royaume de Lombok, Pamatan, vraisemblablement encore enfouie sous les dépôts volcaniques telle Pompéi, devrait stimuler les recherches archéologiques sur Lombok et les îles avoisinantes de Bali et Sumbawa qui ont également subi les conséquences dévastatrices de cette éruption exceptionnelle. Ces recherches interdisciplinaires offrent des perspectives nouvelles de compréhension de l'histoire de l'Indonésie et de celle plus générale de la résilience des sociétés exposées aux éruptions explosives de grande magnitude. ■

Lombok island (Indonesia). Extensive fieldwork data modeling indicated that the eruption evacuated 40 km³ of magma in pyroclastic flows and >40 km high plinian plumes consisting of gas, pumiceous rocks and ash, that blanketed Lombok and the surrounding islands, as far as 660 km from the source in central Java. With total magnitude of 7 and an intensity of 12 (Volcanic Explosivity Index of 7), the 1257 Samalas eruption stands as the most powerful eruption of the last millennium, leaving behind a 6.5 x 8 km wide caldera. Geochemical evidence from the products of the 1257 eruption revealed that Samalas injected into the stratosphere prodigious amounts of sulphur, chlorine and bromine, which rank among the largest volcanogenic gas release over the last 2,300 years. The efficiency of the plume to load volatiles in the upper stratosphere suggests that,

besides the reported global impact on climate, the 1257 Samalas eruption may have generated substantial ozone destruction.

This work inspired further investigations of climate proxies (e.g., tree rings) and historical documents from European sources that attest to the spread of the stratospheric aerosol veil, and the impacts of the associated cooling in the Northern hemisphere. Identifying the volcano has even stimulated an archaeological quest to locate "the lost kingdom of Pamatan" on Lombok – traces of this polity, known from medieval sources, might well be buried beneath the pumice deposits – "a Pompeii of the East". This example highlights the significance – climatological, archaeological, and historical – of identifying volcanoes responsible for very large eruptions, and provides new perspectives on our understanding of the history of Indonesia, the history of climate, and of the resilience of societies exposed to major explosive eruptions and their impacts. ■

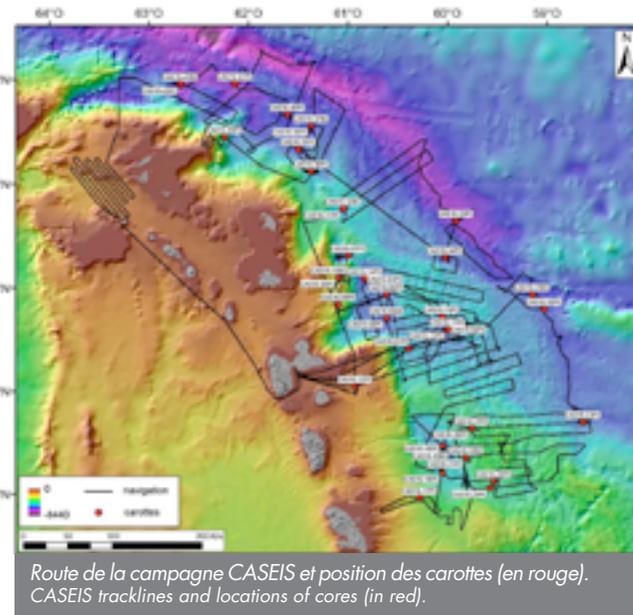


C. M. Vidal, N. Métrich, J.-C. Komorowski, I. Pratomo, N. Kartadinata, A. Michel, V. Robert & F. Lavigne, "The 1257 Samalas eruption (Lombok, Indonesia): the single greatest stratospheric gas release of the Common Era", *Scientific Reports* 6, pp.34868 (2016), doi: 10.1038/srep34868

FOCUS 3 La campagne à la mer CASEIS : améliorer nos connaissances de l'activité sismique de la zone de subduction des Petites Antilles The CASEIS cruise: toward a better understanding of the seismic activity of the Lesser Antilles subduction

L'arc des Petites Antilles est une zone de subduction le long de laquelle les plaques tectoniques Américaines et Caraïbe s'affrontent. L'objectif de la campagne CASEIS est de mieux caractériser l'activité sismique de cette zone de subduction, qui est encore mal connue. En effet, aucun méga-séisme de subduction n'a eu lieu pendant la période instrumentale (1950-aujourd'hui) et la sismicité de l'interface enregistrée par les observatoires volcanologiques et sismologiques de l'institut de physique du globe de Paris (Martinique et Guadeloupe, OVSM, OVSG) est relativement faible si on la compare à d'autres zones de subduction. Le catalogue historique est trop court pour nous permettre d'estimer le temps de récurrence des très grands séismes de subduction dans cette région. Seulement deux séismes ayant probablement rompu l'interface de subduction sont connus au 19^e siècle. Ils ont eu lieu au large de la Martinique en 1839 et au large de la Guadeloupe en 1843. Ce dernier est le plus important reporté dans l'arc des Petites Antilles. Ressenti avec une intensité maximum de IX à X, il a détruit la ville de Pointe-à-Pitre et tué plusieurs milliers de personnes. Ce séisme aurait atteint une magnitude supérieure à 8, voire 8.5.

Au cours des dernières années, les modèles géodésiques ne semblent pas indiquer de chargement inter-sismique au large de l'arc des Petites Antilles. Néanmoins, nos récentes études de paléo-géodésie menées au large de Sumatra et dans l'arc des Petites Antilles, sur la base de l'analyse des microatolls coralliens, montrent que l'accumulation des contraintes au cours du cycle sismique de l'interface de subduction est un phénomène transitoire, qui varie sur des échelles de temps bien plus longues que nos observations géodésiques actuelles (Weil Accardo et al., 2016). La taille et la fréquence des séismes restent donc à élucider le long de l'arc des Petites Antilles, ainsi qu'une potentielle segmentation de la zone de subduction par les rides océaniques de Barracuda, Tiburon et Ste Lucie.



The Lesser Antilles arc results from the subduction of the American plates under the Caribbean plate. This is an area of high seismic hazard where large and damaging earthquakes may occur in the future. The aim of the CASEIS cruise was to constrain better the seismic potential of this subduction, which is poorly known. No large earthquake was recorded during the instrumental period (1950-2017) and the rate of the seismicity recorded by the French volcanological and seismological observatories of IPGP in Guadeloupe and Martinique is low compared to other subduction zones worldwide. The historical catalog of earthquakes began in the middle of the 17th century, together with the European settlement, and is too short to estimate the recurrence time of megathrust earthquakes in this region. Only two earthquakes maybe originating from the plate interface were documented in the middle of the 19th century. They have occurred four years apart on January 11th 1839 in Martinique and on February 8th 1843 in Guadeloupe. The latter one completely destroyed the city of Pointe-à-Pitre and killed more than 1500 peoples. With a maximum intensity of IX to X, it may have reached a magnitude larger than 8.

Le projet CASEIS vise à documenter l'activité sismique du méga-chevauchement antillais au cours du Quaternaire récent, à partir d'études de paléosismologie sous-marine basées sur l'enregistrement sédimentaire des turbidites. Les très grands séismes de subduction, contrairement à d'autres phénomènes (éruptions, crues, séismes locaux, déstabilisation de flancs de volcans ou de plateformes récifales), provoquent des turbidites sur une zone au moins aussi large que la rupture sismique qui peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres de long. On retrouve donc ces dépôts dans la plupart des bassins et systèmes de chenaux situés sur la plaque chevauchante, à l'aplomb de la zone de rupture.

La campagne s'est déroulée du 27 mai au 5 juillet 2016, 40 carottes ont été prélevées au large de la Guadeloupe et de l'île d'Antigua, soit plus de 500 m d'enregistrement sédimentaire. La carotte la plus longue récoltée mesure 29 m et devrait permettre de documenter l'activité sismique quaternaire de la région. Chaque carotte contient de nombreuses turbidites, et une turbidite-homogénite de 4 mètres a été prélevée au large de la Guadeloupe. En parallèle, les bassins sédimentaires échantillonnés ont été imagés par bathymétrie, sismique réflexion et Chirp-3.5 kHz afin de mener des études morpho-tectoniques dans la région.

Cette campagne a été associée à un projet pédagogique pour expliquer aux plus jeunes les enjeux d'une telle mission. Un livret pédagogique a été rédigé et un blog a été tenu à jour pendant toute la campagne (www.ipgp.fr/caseis). Le livret pédagogique est téléchargeable à cette adresse : www.ipgp.fr/livretcaseis.

De nombreux laboratoires en France et à l'étranger sont impliqués dans le projet : institut de physique du globe de Paris, IFREMER, LSCE-CEA, Muséum National d'Histoire Naturelle, Oregon State University, université de Bordeaux, université de Nice Sophia Antipolis, université Pierre et Marie Curie, université du Québec à Rimouski, université Savoie-Mont Blanc. ■



Modeling made by using GPS data acquired since few years in the Lesser Antilles arc tend to show that no interseismic strain is accumulating offshore the Lesser Antilles, above the subduction interface. However, recent studies made on microatolls corals in the Lesser Antilles and elsewhere (Sumatra, Vanuatu) reveal that interseismic strain may accumulate in a transient way, with strong variations at decadal or centennial time scales (much longer than period covered by geodetic measurements, Weil Accardo et al., 2016). We need more information to constrain better the size and recurrence time of earthquakes in the Lesser Antilles arc as well as the segmentation of the subduction zone.

The aim of the CASEIS cruise was to document the seismic activity of the Lesser Antilles megathrust during the late Quaternary by using the sedimentary record of turbidites in marine cores. Unlike other phenomena (eruption, flood, local small earthquakes, landslides), the large subduction earthquakes promote turbidites and other sudden sediment influxes on an area as large as the seismic rupture (several hundred kilometers). We can retrieve those deposits in most basins and submarine channel systems above the megathrust.

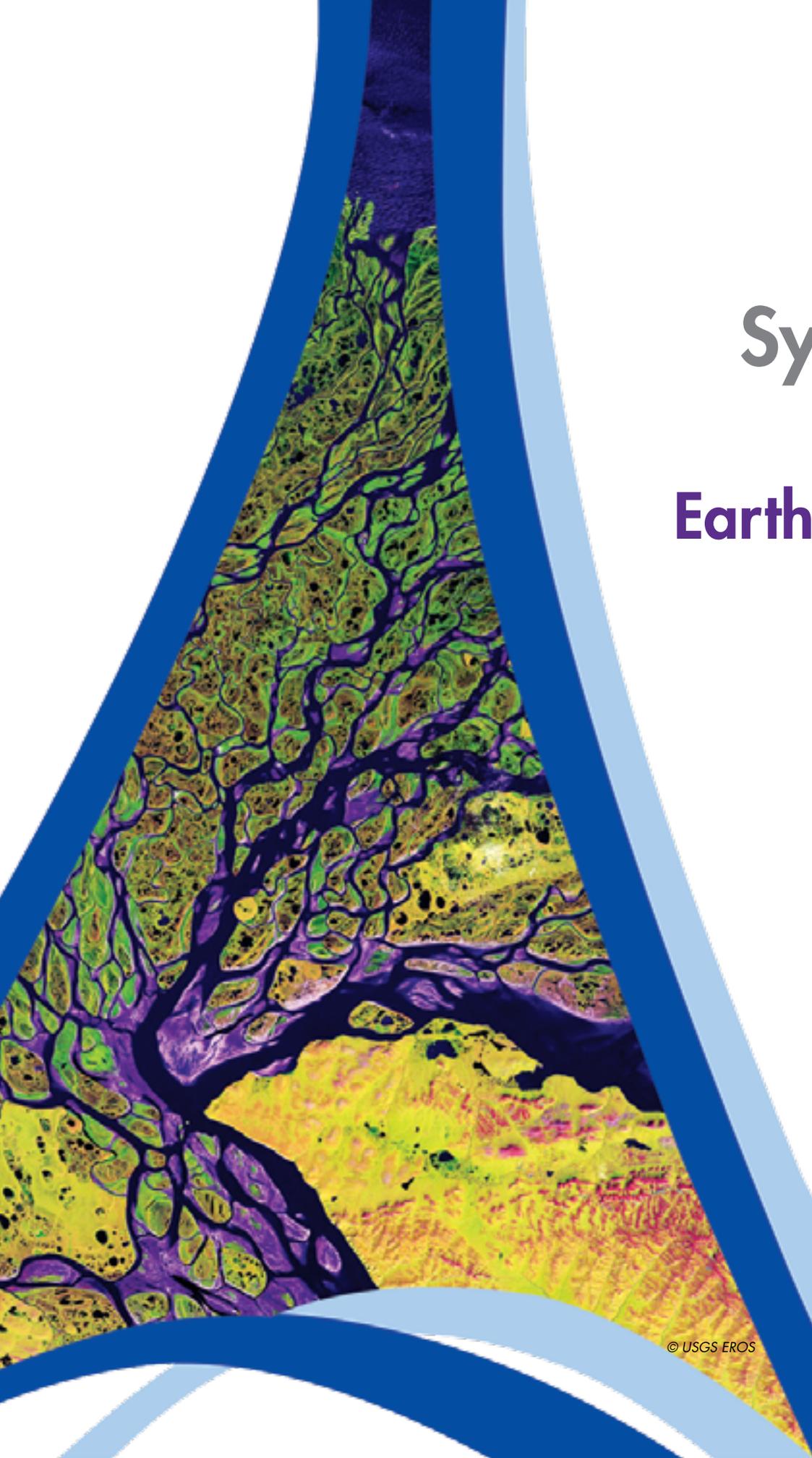
During the cruise, which has occurred between May 27th and July 5th 2016, 42 sediment cores were collected (up to 510 m of sediment) between Martinique and the Anegada passage. The longest core was 29 m long and will probably allow documenting the seismic activity over a long period of time over the late Quaternary. Each core contains numerous turbidites. We already identified several turbidites topped by a few meter thick homogenites. Such sedimentary sequences may have been deposited during large earthquake and tsunamis offshore Guadeloupe. We also have surveyed the sedimentary basins and turbiditic systems with bathymetric, seismic reflection and chirp data.

During the CASEIS cruise, we also developed a pedagogic project with schools to explain the stakes of such a cruise to children. A booklet has been written (www.ipgp.fr/livret-caseis) and a blog was created (www.ipgp.fr/caseis). We also developed a small analogical model to reproduce a turbidity current and explain the phenomena.

Numerous laboratories in France and outside are part of the project: institut de physique du globe de Paris, IFREMER, LSCE-CEA, Muséum National d'Histoire Naturelle, Oregon State University, Université de Bordeaux, Université de Nice Sophia Antipolis, Université Pierre et Marie Curie, Université du Québec à Rimouski, Université Savoie-Mont Blanc. ■



N. Feuillet, C. Beck, A. Cattaneo, C. Goldfinger, H. Guyard, P. Morena, E. Moreno, J.R. Patton, G. Ratzov, C. Seibert, G. St-Onge & CASEIS cruise team, "Possible Sedimentary Evidence for Paleoequakes along the northern Lesser Antilles: preliminary results from the CASEIS cruise aboard the N/O Pourquoi Pas?", *SSA Meeting, Denver (2017)*, doi: 10.17600/16001800



Systeme Terre

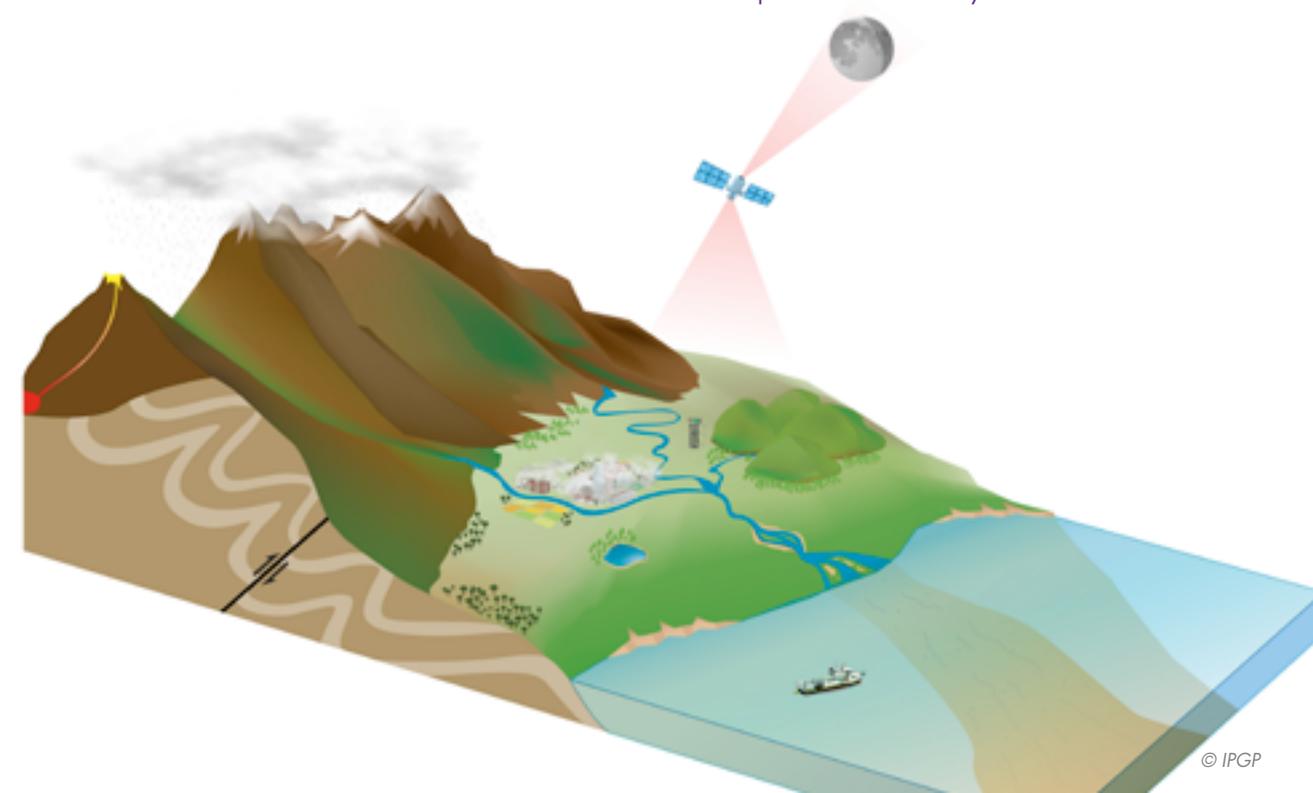
Earth system science

Ce thème s'intéresse aux interactions entre les différentes couches externes de notre planète mais également à l'impact des activités humaines sur celles-ci. Les surfaces continentales et le fond des océans sont des milieux complexes où les organismes vivants, l'air, le sol, l'eau et la roche interagissent entre eux. Théâtre de transformations chimiques et de transport de flux d'énergie et de matière, ces milieux constituent un réacteur physique-biologique-chimique à l'interface entre l'intérieur de la planète (lithosphère), la surface (hydrosphère, cryosphère, biosphère) et l'enveloppe externe (atmosphère) et jouent donc un rôle environnemental majeur à la surface de la Terre. Ils incluent notamment la zone critique, couche la plus externe de notre planète qui s'étend de la base des aquifères au sommet de la couche limite atmosphérique. La zone critique concentre la plupart des activités humaines et est sujette à de rapides et profonds changements affectant les organismes vivants et leur environnement.

Dans cette optique, il est primordial de surveiller, d'analyser et de modéliser les cycles biogéochimiques à la surface de la Terre dont ceux associés à l'eau, au carbone, aux nutriments, aux organismes et/ou aux roches. La sensibilité de ces cycles au changement climatique, la manière dont ils interagissent entre eux, les changements subis au cours des temps géologiques tout au long du Phanérozoïque ou encore la manière dont ils évolueront dans le futur sont des sujets d'études actuels. De tels questionnements s'appliquent par extension aux autres planètes et corps planétaires du système solaire ayant évolué parallèlement à la Terre. Comprendre les interactions entre les compartiments de ces surfaces à différentes échelles temporelles allant des périodes géologiques les plus anciennes jusqu'à

Earth system science deals with the interactions between the Earth's "spheres" as well as with the impact of human societies on these components. Continental and seabed surfaces are complex media where living organisms, air, soil, water, and rock interact. Resulting from physical transport and chemical transformation induced by fluxes of energy and matter, they play a major environmental role as a physical-biological-chemical reactor at the interface between the interior of the planet (lithosphere), the surface (hydrosphere, cryosphere, biosphere) and the outer envelope (atmosphere). These surfaces include the critical zone, the inhabited outermost layer of our planet, extending from the bottom of aquifers to the top of the atmospheric boundary layer. The critical zone supports almost all human activities and is currently subject to rapid and profound changes that impact living organisms and their environment.

In that respect, it is crucial to monitor, analyze and model the bio-geo-chemical cycles occurring at the Earth's surface including those associated with water, carbon, nutrients, organisms and/or rocks. The sensitivity of these cycles to climate change, how they interact, the changes they have undergone throughout geological time across the entire Phanerozoic, and how they may evolve in the future all continue to be open questions. Such studies extend to other planets and planetary bodies of the Solar System that have evolved in parallel to the Earth. Understanding the interactions between the many components of these surfaces across a range of timescales, from the early geological times to present time, and space scales ranging from the mineral interface and living cells to terrestrial planets, is an ambitious challenge that researchers at IPGP have undertaken. Indeed, over the years, our institute has pioneered a cross-disciplinary integrated scientific approach based on observations made at different scales by environmental networks and remote sensing sensors, analytical and experimental developments as well as coupled physical, chemical and biological models. In the next five years, IPGP will tackle innovative and groundbreaking projects aimed at furthering our understanding of the Earth and other planets as a whole system.



© USGS EROS

© IPGP

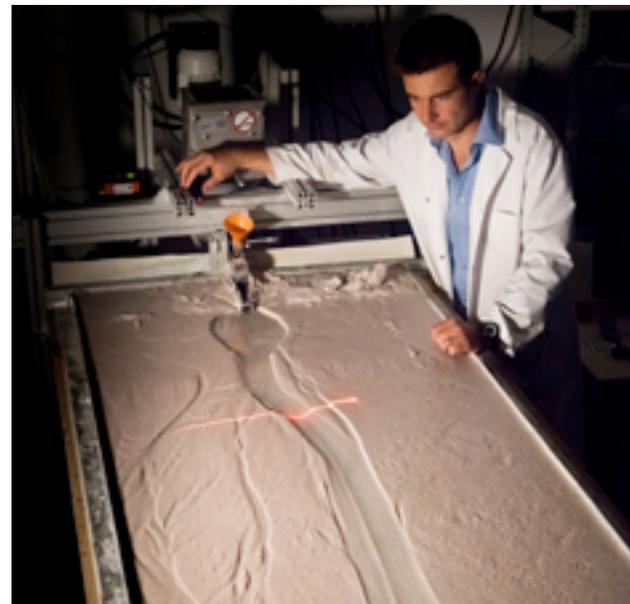
nos jours, ainsi qu'à des échelles spatiales allant de la taille du minéral ou de la cellule aux planètes telluriques, est un défi ambitieux que les chercheurs de l'IPGP ont décidé de relever. En effet, notre institut a, au fil des ans, ouvert la voie à une approche scientifique intégrée basée sur des observations effectuées à différentes échelles grâce à des réseaux de mesures environnementales basés sur la télédétection, au développement de méthodes analytiques et expérimentales, ainsi qu'à la modélisation physique, chimique et biologique. Au cours des cinq prochaines années, l'IPGP s'impliquera dans des projets novateurs qui feront progresser notre compréhension de la Terre et des autres planètes en tant que système global.

Cinq défis majeurs ont été identifiés dans le cadre de ce thème :

- Les processus biogéochimiques dans la zone critique : leur compréhension est fondamentale pour préserver des ressources naturelles (matières premières, sols et eau) limitées et affectées par le changement climatique et les activités anthropiques.
- L'évolution des paysages : de quelle manière et à quelle vitesse les paysages créés par des processus endogènes et exogènes évoluent-ils à l'interface entre la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère ?
- La planétologie comparée : comment des phénomènes analogues variés (physiques, chimiques, morphologiques, etc.) se manifestent-ils sur d'autres planètes ?
- Paléoenvironnements : quelles sont les causes des changements brutaux dans la dynamique de la surface de la Terre, tels qu'enregistrés dans les archives sédimentaires ?
- La biosphère profonde : comment influence-t-elle la dynamique de la surface de la Terre ? ■

Five major challenges have been identified in the field of Earth surface processes:

- Biogeochemical processes in the critical zone: a fundamental understanding is needed to preserve our limited natural resources (matter, land and water) affected by a changing climate and anthropogenic activities.
- Landscape evolution: how and how fast are landscapes created by exogenic and endogenic processes acting at the interface between the lithosphere and the atmosphere and hydrosphere?
- Comparative planetary science: how analogous phenomena of various kinds (physical, chemical, morphological and so forth) manifest themselves in different planets?
- Paleoenvironments: what are the causes for the abrupt past changes in Earth surface dynamics recorded in sedimentary archives?
- The deep biosphere: how does it influence Earth's surface dynamics? ■



Mini-rivière de laboratoire permettant de comprendre comment les rivières creusent leur lit et transportent les sédiments. Laboratory river to understand how rivers dig their bed and transport sediments. © IPGP

tions environnementales majeures (Courtillet et Renne, 2003). Cela concerne les extinctions du Paléozoïque, notamment les trapps de Sibérie lors de la crise Perm-Trias, la Central Atlantic Magmatic Province lors de la crise Trias-Jurassique, les Trapps du Deccan lors de la crise Crétacé-Tertiaire, mais également des extinctions mineures. Si le lien de cause à effet est clairement établi, les processus à l'origine des perturbations environnementales et des extinctions restent mal compris. Il semble toutefois que les grandes quantités de gaz (CO₂, SO₂...) injectées dans l'atmosphère déstabilisent le système climatique et induisent des perturbations environnementales. Ces gaz peuvent être émis lors de la mise en place des coulées volcaniques et par le dégazage induit par métamorphisme de contact dans le cas où le magma traverse des unités sédimentaires riches en carbone ou en soufre.

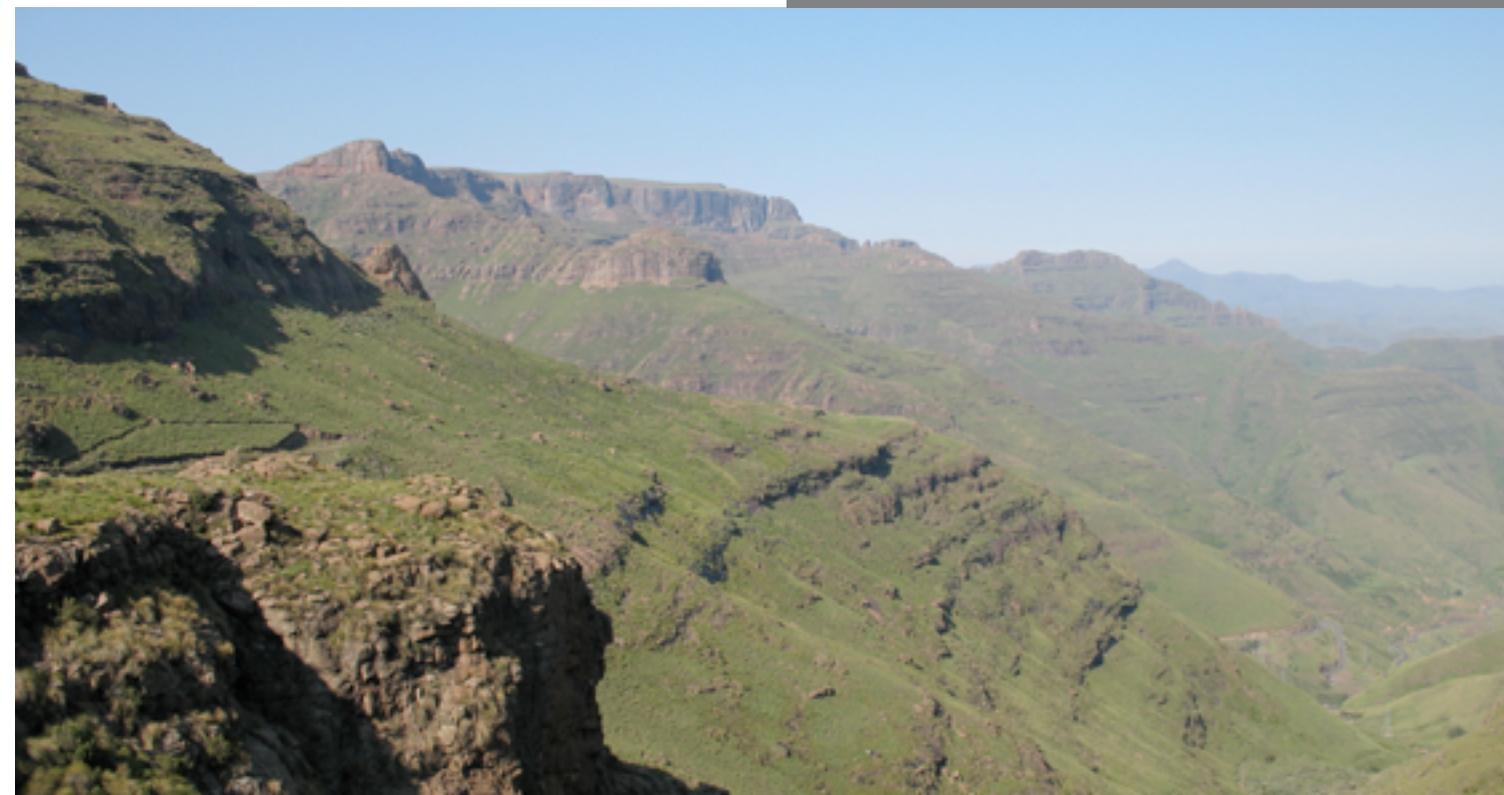
Le tempo de l'activité volcanique lors de la formation des trapps pourrait jouer un rôle important sur l'ampleur des perturbations environnementales. Notre étude a porté sur la mise en place des trapps du Karoo. Datée entre 183-179 Ma (Jourdan et al., 2008), ce trap est associé à l'extinction de second ordre du Pliensbachien-Toarcien (tout en étant une des plus importantes extinctions marines du Mésozoïque) et à des perturbations environnementales marquées (anoxie marine, perturbation du cycle du carbone, changements climatiques) (Guex et al., 2012). Pour contraindre le tempo de la mise en place, nous avons utilisé la géochronologie et le paléomagnétisme. La géochronologie K-Ar et ⁴⁰Ar/³⁹Ar permet de dater la formation mais compte-tenu des incertitudes inhérentes à la méthode, ne permet

at the Cretaceous-Tertiary boundary) as well as second-order mass extinction (for example, the Karoo CFB at the Pliensbachian-Early Toarcian). Although the cause and effect relationship is largely admitted, details of the mechanisms causing environmental perturbations and mass extinctions remain an open question. However it seems that large amounts of gases (CO₂, SO₂...) injected into the atmosphere destabilize the climate system and induce environmental perturbations. These gases can be emitted during lava flow emplacement and by degassing induced by contact metamorphism in cases where magmas are intruded in C- or S-rich sedimentary layers.

Tempo of CFB volcanism can play a key role on the intensity of environmental perturbations. This study focuses on the emplacement of the Karoo CFB. This CFB dated 183-179 Ma (Jourdan et al., 2008) is associated with the second-order Pliensbachian-Toarcian mass extinction (one of the most important marine extinction of the Mesozoic) and major environmental perturbations (oceanic anoxic event, carbon isotopic excursion, climate changes...) (Guex et al., 2012). We used geochronology and paleomagnetism to determine the tempo of Karoo volcanism. K-Ar and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating methods yield the age of emplacement, but accounting for uncertainties, they do not permit to constrain the tempo of emplacement. Paleomagnetism can constrain the rhythm of magma outpouring. During its emplacement, lava flow records an "instantaneous picture" of the Earth's magnetic field. Directions of remanent magnetization in two (or more) superimposed lava flows are statistically similar if the duration of emplacement (including cooling) is too little to record the secular variation of the Earth's magnetic field. In that case, superimposed lava flows represent a temporal unit (volcanic pulse).

We sampled 97 lava flows (8 to 10 cores per lava flow) for paleomagnetism and 13 for geochronology in the

Les trapps du Karoo vu depuis Moteng Pass, Lesotho. Karoo continental flood basalts from Moteng Pass, Lesotho. © IPGP



FOCUS 1 Histoire éruptive des trapps du Karoo et son impact sur l'environnement au Toarcien
Eruptive history of the Karoo lava flows and their impact on Toarcian environment

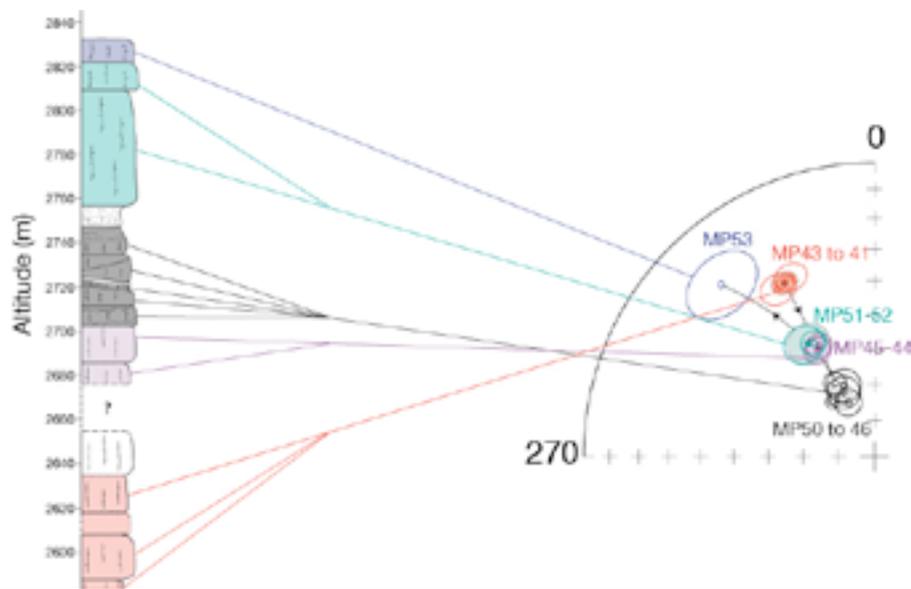
La formation de grandes provinces basaltiques ponctue l'histoire de la Terre. Pour le Phanérozoïque, on dénombre une douzaine de provinces basaltiques continentales (trapps) ou de plateaux sous-marins dont le volume excède 1 million de km³ pour une durée de mise en place de l'ordre d'un à quelques millions d'années. Les études menées sur ces provinces basaltiques âgées de moins de 360 Ma montrent que ce volcanisme exceptionnel est corrélé temporellement avec des phases d'extinction de masse et des perturba-

Formations of large igneous provinces have punctuated Earth's history. For the Phanerozoic, there are twelve continental flood basalts (CFB) and giant oceanic plateaus. The volume of extruded magma, predominantly basalts, exceeds one million km³ and the duration of emplacement is on the order of 1 Myr or longer. LIPs formed over the last 360 Myr are temporally correlated with mass extinctions and environmental perturbations (Courtillet et Renne, 2003). It concerns 6 first-order mass extinctions, notably the Siberian CFB at the Perm-Triassic boundary, the Central Atlantic Magmatic Province at the Triassic-Jurassic boundary and the Deccan CFB

pas de contraindre précisément le tempo de la mise en place. Le paléomagnétisme va apporter cette information. Chaque coulée volcanique conserve une "image instantanée" du champ magnétique au moment de sa mise en place. Les directions d'aimantation rémanente dans deux coulées volcaniques (ou plus) superposées seront statistiquement identiques si celles-ci se sont mises en place (et refroidies) trop rapidement, de l'ordre de la centaine d'années, pour enregistrer la variation séculaire du champ magnétique. Ces coulées superposées constituent donc une unité temporelle (pulses volcaniques).

Nous avons échantillonné 97 coulées volcaniques pour l'étude paléomagnétique et 13 pour l'étude géochronologique du groupe du Drakensberg au Lesotho (~1500 m d'épaisseur). Les datations $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ montrent que cette série s'est mise en place à 181.3 ± 1 Ma, en accord avec les datations antérieures. L'analyse de la variation séculaire permet d'isoler 21 pulses volcaniques (de 2 à 8 coulées) et 16 coulées individuelles. Une seule inversion magnétique est enregistrée dans le groupe du Drakensberg. Compte tenu du taux d'inversion à cette époque (~4 inversions par millions d'années), le groupe du Drakensberg s'est probablement mis en place en ~250 kyr, ce qui est en accord avec les âges U-Pb sur zircon obtenues sur le système intrusif (Sell et al., 2014) associé à la formation Lesotho (partie supérieure du groupe du Drakensberg, 1300 m d'épaisseur). Sell et al. (2014) montrent également que les perturbations environnementales du Pliensbachien-Toarcien sont synchrones avec la mise en place du système intrusif et donc de la formation Lesotho. Le nombre restreint de pulses volcaniques et de coulées volcaniques témoigne d'une activité volcanique intermittente (quelques kyr sur ~250 kyr), mais les volumes de magma mis en place lors de ces événements (non quantifiable malgré des corrélations entre coulées volcaniques distantes de 300 km) ont émis de grandes quantités de gaz volcaniques, susceptibles de perturber le système climatique et l'environnement au début du Toarcien. ■

Drakensberg group in Lesotho (~1500 m thick section). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating yield an age of $181,3 \pm 1$ Ma, in agreement with previous ages. Analyses of the secular variation allow to determine the presence of 21 volcanic pulses (including 2 to 8 lava flows) and 16 individual lava flows. One magnetic reversal is recorded within the Drakensberg group. Accounting for the reversal rate at that time (~4 reversals per Myr), the Drakensberg group was likely emplaced over a period as short as ~250 kyr, in agreement with the distribution of U-Pb ages on zircon from the intrusive system (Sell et al., 2014) geochemically similar to the Lesotho formation (upper part of the Drakensberg group, ~1300 m thick). Sell et al. (2014) showed that the environmental perturbations of the Early Toarcian were coeval with the emplacement of the intrusive system and as a consequence of the Lesotho formation. The small number of volcanic pulses and individual lava flows suggests an intermittent magma outpouring (representing a few kyrs of volcanic activity over the ~250 kyr period), but the amount of magma during each event (this volume can not be estimated despite correlation between lava flows separating by 300 km), released large amount of volcanic gases within the atmosphere, that may have deeply impacted climate and environment of the Early Toarcian. ■

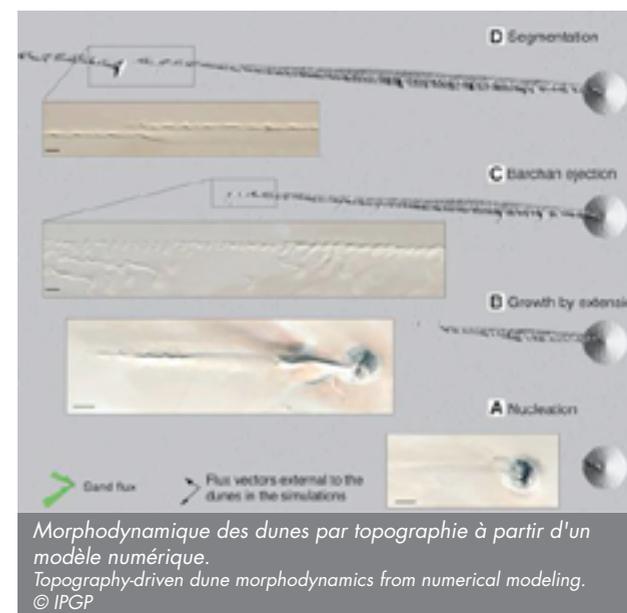


Les coulées volcaniques superposées enregistrent une direction magnétique rémanente statistiquement identique. The superimposed volcanic flows record a residual magnetic direction statistically identical. © IGP

➔ M. Moulin, F. Fluteau, V. Courtillot, J. Marsh, G. Delpech, X. Quidelleur & M. Gérard, "Eruptive History of the Karoo lava flows and their impact on early Jurassic environmental change", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122 (2017), doi:10.1002/2016JB013354

FOCUS 2 Estimation des flux sédimentaires à partir de l'élongation de dunes linéaires
Sediment flux from the morphodynamics of elongating linear dunes

Les dunes de sable sont des formations superficielles très répandues sur Terre, mais aussi sur d'autres corps du système solaire. La modélisation de leur croissance linéaire, par extension ou par accréation latérale, est difficile en raison de notre compréhension limitée des mécanismes sous-jacents. Par conséquent, l'estimation de flux de sable à partir d'images aériennes ou satellite repose essentiellement sur la vitesse de migration des barcanes, et non pas sur leur dynamique. En couplant plus d'un demi-siècle d'images à des résultats de modèles numériques, les chercheurs ont montré que les dunes sahariennes du désert du Ténéré (Niger), la première source d'aérosols minéraux au monde, s'allongeaient de plusieurs dizaines de mètres par an sans opérer de migration latérale. Elles forment alors de longs cordons dunaires tout en conservant la même orientation sur de très longues distances pouvant dépasser 50 km.

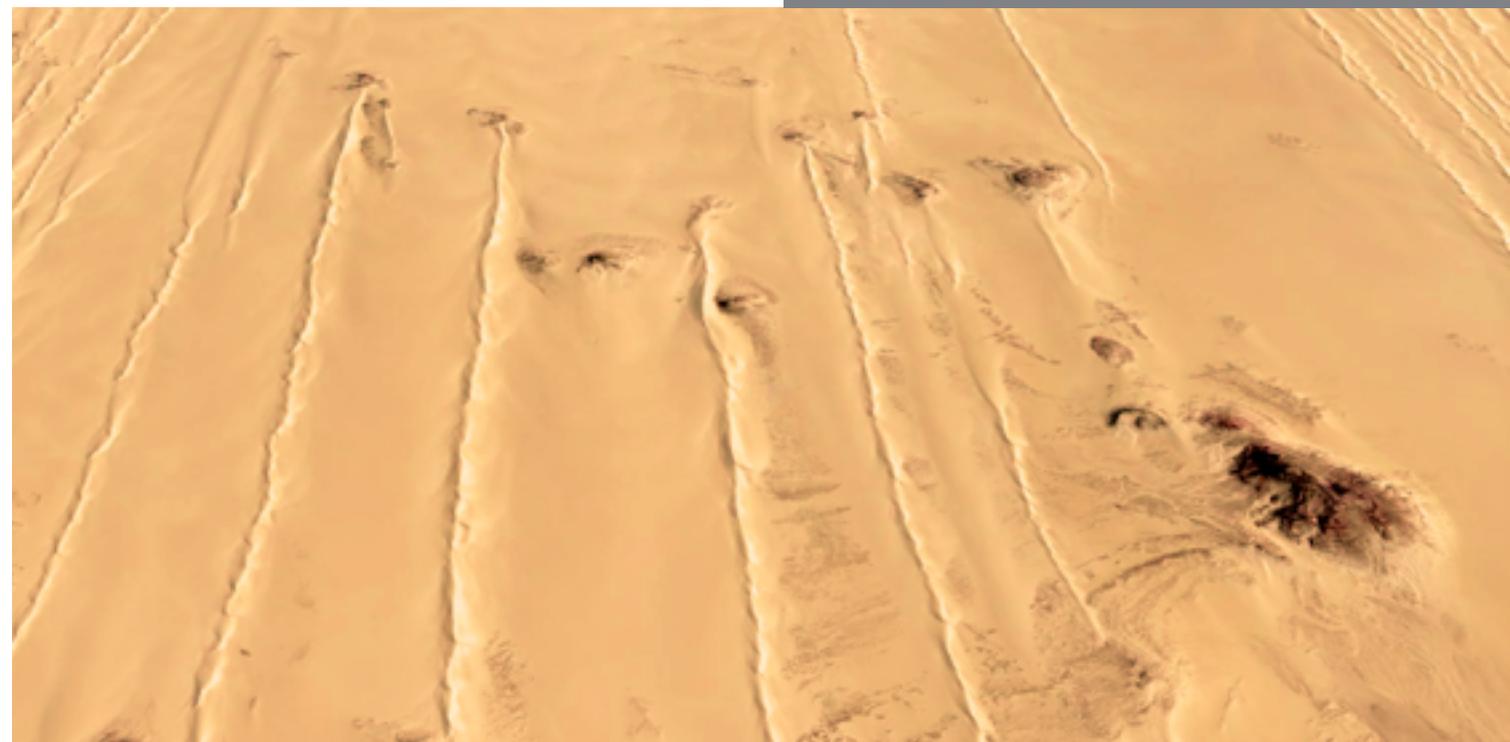


Morphodynamique des dunes par topographie à partir d'un modèle numérique. Topography-driven dune morphodynamics from numerical modeling. © IGP

Ainsi, la position de chaque dune reste stable au cours du temps, mais le taux d'extension de l'extrémité de la dune permet d'estimer l'intensité du transport sédimentaire le long de la crête. L'orientation et la vitesse d'élongation des dunes linéaires peuvent alors être directement reliées aux propriétés (direction et intensité) des vents qui les sculptent. Dans des zones où les vents sont mal connus, ce type d'observation peut donc apporter de nouvelles données sur le climat et sur le transport sédimentaire. C'est typiquement le cas sur Terre mais aussi sur Mars et Titan, le plus grand satellite de Saturne, où de nombreuses dunes linéaires ont également été observées. ■

Sand dunes are very common bedforms on earth, but also on other bodies of the Solar System. Modeling their linear growth, either by extension or lateral accretion, is difficult due to our limited understanding of the underlying mechanisms. Therefore, sand flux estimates using airborne or spaceborne imagery essentially rely on the migration speed of barchan dunes, and not on their dynamics. By combining more than half a century of images with numerical model results, researchers have shown that the Saharan dunes of the Ténéré desert (Niger), the world's largest source of mineral aerosols, were extending tens of meters per year without lateral migra-

Dunes linéaires longitudinales au Niger. Longitudinal linear dunes in Niger. © Google Earth



tion. They form long barriers of dunes while maintaining the same orientation over very long distances that can exceed 50 km.

Thus, the position of each dune remains stable over time, but the extension rate of the dune end allows estimating the intensity of sediment transport along the ridge. The orientation and elongation speed of the linear dunes can be then directly related to the properties (direction and intensity) of the winds that sculpt them. In areas where winds are poorly known, this type of observation can provide new information on climate and sediment transport. This is typically the case on Earth but also on Mars and Titan, Saturn's largest satellite, where many linear dunes have been also observed. ■



A. Lucas, C. Narteau, S. Rodriguez, O. Rozier, Y. Callot, A. Garcia & S. Courrech du Pont, "Sediment flux from the morphodynamics of elongating linear dunes", *Geology* 43 (11): 1027-1030 (2015), doi: 10.1130/G37101.1

FOCUS 3

Fractionnement des isotopes du zinc lors de l'adsorption à la surface de la kaolinite Zn isotope fractionation during sorption onto kaolinite

Depuis l'avènement de l'ère industrielle, les activités humaines ont profondément modifié le cycle et le comportement des métaux au sein de la zone critique, la fine pellicule de la surface de la Terre extrêmement réactive aux perturbations qui l'affectent. Parmi ces métaux, le zinc (Zn) est un élément important en tant que micro-nutriment. Afin de contraindre les modifications engendrées par les activités anthropiques, une connaissance préalable du cycle naturel du Zn à la surface de la Terre semble requise. Plus précisément, la mobilité et la disponibilité de cet élément dans les environnements tels que les sols et les rivières sont principalement régies par les réactions d'adsorption du Zn sur les phases minérales constitutives de ces milieux (oxydes, matière organique, argiles). Afin d'identifier l'impact de ces interactions sur la dynamique du Zn, la mesure des rapports isotopiques de cet élément, devenue possible il y a environ 15 ans, est un puissant outil analytique. En effet, ces rapports isotopiques sont susceptibles d'être modifiés de façon bien spécifique lors des processus physico-chimiques tels que la formation d'argiles, la complexation avec la matière organique ou l'adsorption sur les phases minérales.

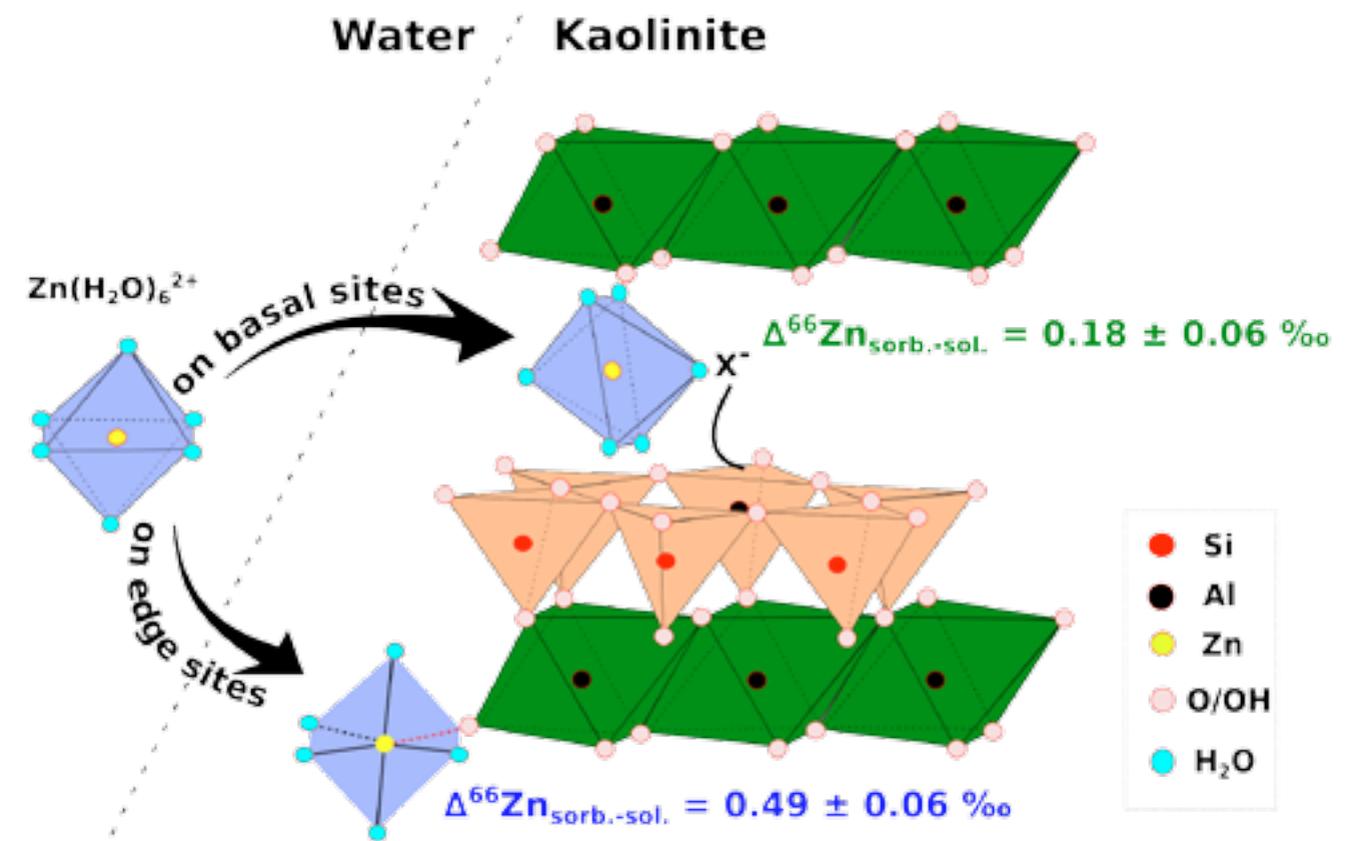
Since the beginning of the Anthropocene, human activities have deeply impacted the biogeochemical cycles of metals in the critical zone, the thin layer at the Earth surface where the current global change is expressed. Among these metals, zinc (Zn) is an important micro-nutrient. In order to better constrain shifts induced by human activities, a prerequisite is the knowledge of the "natural" Zn cycle at the Earth surface. More specifically, the mobility and availability of this element in soils and rivers are mainly dictated by Zn adsorption on major mineral phases such as oxides, organic matter, or clays. To identify the impact of these interactions on the Zn cycle, the measurement of Zn isotope ratios, which became available 15 years ago, is a powerful analytical tool. Indeed, these isotope ratios are likely to be modified in a very specific way during physical and chemical processes such as clay formation, complexation with organic matter, or adsorption into mineral surfaces.

Nevertheless, it is still unknown whether a so-called "fractionation" of Zn isotopes occurs during Zn adsorption onto clays. To close this knowledge gap, the authors performed well controlled Zn adsorption experiments onto kaolinite, the most abundant clay in tropical context, where mineral-metal interactions are favored. These experiments were conducted for different conditions of pH, ionic strength and total Zn concentration. Results show a significant fractionation of Zn isotopes during adsorption, with an enrichment of the heavy Zn isotopes at the kaolinite surface, the magnitude of which depends on pH and ionic strength ($\Delta^{66}\text{Zn}_{\text{kaolinite-solution}}$ of 0.11 to 0.49 ‰). This variability in the fractionation is explained using thermodynamical modeling in which two types of complexation sites at the clay surface are considered: crystal edge sites complexing Zn at high pH and ionic strength; and basal sites involved at lower pH and ionic strength.

This important study closes a knowledge gap, a necessary step to better understand this type of interactions in natural settings. It appears now possible, using Zn isotopes, to detect these metal-clay interactions, and to quantify their impact on Zn mobility, be it in soils where chemical reactivity is largely due to clays, or in other contexts such as estuaries where flocculation processes are prominent and where trace metal dynamics is still poorly constrained. ■

à la surface de l'argile : les sites de bordures du cristal de kaolinite, complexant le Zn à fort pH et force ionique élevée ; et les sites basaux impliqués à faible pH et faible force ionique.

Cette étude importante complète les connaissances fondamentales nécessaires à la mise en évidence de ce type d'interactions dans le milieu naturel. En effet, il apparaît désormais possible de détecter ces interactions métal-argile à l'aide des isotopes du Zn et de quantifier l'impact de ces dernières sur la mobilité du Zn, que ce soit dans les sols où une importante part de la réactivité chimique est contrôlée par les argiles, ou encore au niveau des estuaires où des phénomènes de floculation argileuse se produisent et où la dynamique des métaux traces reste peu connue. ■



La concentration de Zn mesurée et son rapport isotopique sont décrits correctement en utilisant un modèle de sorption thermodynamique qui considère deux sites de liaison : les sites de surfaces basales et les sites de bordure. Sur la base de cette approche de modélisation, deux facteurs distincts de fractionnement isotopique de Zn ont été calculés : $\Delta^{66}\text{Zn}_{\text{sorb.-sol.}} = 0,18 \pm 0,06 \text{ ‰}$ pour l'échange d'ions sur les sites basaux, et $\Delta^{66}\text{Zn}_{\text{sorb.-sol.}} = 0,49 \pm 0,06 \text{ ‰}$ pour la complexation par les sites de bordure. Ces deux facteurs distincts indiquent que le fractionnement des isotopes Zn est dominé par la composition chimique de la solution (pH, force ionique). The measured Zn concentration and its isotopic ratio are correctly described using a thermodynamic sorption model that considers two binding sites: external basal surfaces and edge sites. Based on this modeling approach, two distinct Zn isotopic fractionation factors were calculated: $\Delta^{66}\text{Zn}_{\text{sorb.-sol.}} = 0.18 \pm 0.06 \text{ ‰}$ for ion exchange onto basal sites, and $\Delta^{66}\text{Zn}_{\text{sorb.-sol.}} = 0.49 \pm 0.06 \text{ ‰}$ for specific complexation onto edge sites. These two distinct factors indicate that Zn isotope fractionation is dominantly controlled by the chemical composition of the solution (pH, ionic strength).



D. Guinoiseau, A. Gélabert, J. Moureau, P. Louvat & M.F Benedetti, "Zn Isotope Fractionation during Sorption onto Kaolinite", *Environmental Science & Technology*, 50, 1844-1852 (2016), doi: 10.1021/acs.est.5b05347

Origines Origins

La Terre et tous les autres objets du système solaire sont issus du même réservoir initial, le disque d'accrétion solaire, tout en présentant une composition et une structure très différentes. Les processus à l'origine de ces disparités sont encore largement méconnus. Ces derniers sont également responsables de la composition de la matière première à partir de laquelle la vie est apparue, ainsi que des conditions environnementales propices au développement des premiers organismes vivants sur Terre, voire ailleurs dans le système solaire et même au delà, sur des planètes extrasolaires. L'IPGP est un des rares établissements où des scientifiques de différents domaines de recherche peuvent travailler ensemble sur le décryptage des processus à l'origine du système solaire, de ses planètes et de son habitabilité. Par exemple, la télédétection, la gravimétrie orbitale ou encore la cartographie magnétique sont utilisées pour étudier l'évolution géologique des planètes telluriques ainsi que l'origine et l'histoire de leur atmosphère. Les propriétés minéralogiques, magnétiques et isotopiques de matière extraterrestre et de roches précambriennes permettent de fournir un aperçu de l'origine et de l'évolution précoce de la Terre et de ses précurseurs. De nombreux types d'échantillons sont étudiés : des météorites, des échantillons ramenés sur Terre lors de missions spatiales tels que des roches lunaires ou encore d'anciennes roches terrestres collectées au sol ou par forage profond.

Cinq questions majeures ont été identifiées dans ce domaine :

- Découvrir quand et comment les premiers objets solides et les planètes se sont formés dans le système solaire et les processus qui ont modulé leur composition chimique et isotopique de base, avec un accent mis sur l'origine nucléosynthétique des éléments chimiques trouvés dans le système solaire.



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

While the Earth and all other solar system objects formed from the same initial reservoir, the solar accretion disk, they have very different composition and structure. The processes at the origin of these differences remain largely unknown. They also controlled the composition of the raw materials from which life originated and the environmental conditions pertaining to the development of the first living organisms on Earth, and perhaps also elsewhere in the Solar System, or even further away among extrasolar planets. IPGP is one of very few institutions where scientists from different fields can work together towards deciphering the processes that shaped the Solar System, its planets and its habitability. For instance, remote sensing, orbital gravimetry and magnetic mapping are used to study the early geological evolution of terrestrial planets and the origin and history of atmospheres. Mineralogical, magnetic and isotopic properties of extra-terrestrial matter and Precambrian rocks are used to provide insights into the origin and early evolution of the Earth and its precursors. Many types of samples are studied: meteorites, and samples brought back to Earth by space missions such as lunar rocks, as well as ancient terrestrial rocks collected in the field or through deep drilling.

Five major questions in the field of Origins have been identified:

- Find out when and how the first solids and planets formed in the solar system and the processes that controlled their bulk chemical and isotopic composition, with a focus on the complex nucleosynthetic origin of the chemical elements found in the solar system.
- Elucidate the origin of moons and rings around planets and reconstructing the collisional history of terrestrial planets, with a special emphasis on the origin, internal structure and early evolution of our Moon.
- Determine the key parameters controlling planetary differentiation into a metallic core, a silicate mantle and a silicate

- Faire la lumière sur l'origine des lunes et des anneaux entourant certaines planètes et reconstituer l'histoire collisionnelle des planètes telluriques, avec une attention particulière apportée à l'origine, la structure interne et l'évolution précoce de notre Lune.
- Déterminer les paramètres clés responsables de la différenciation planétaire en un noyau métallique, un manteau et une croûte silicatée : comprendre comment les premiers océans et l'atmosphère se sont formés et ont évolué sur Terre au cours de l'histoire géologique.
- Comprendre quand et comment la géodynamo, la convection du manteau et la tectonique des plaques ont commencé sur Terre, leurs conséquences sur les conditions de surface et pourquoi l'évolution des autres planètes telluriques a été très différente.
- Décrypter les indices et les causes des changements les plus importants des conditions de surface de la Terre au cours du Précambrien et identifier les premières traces de vie ou de composés organiques. ■

crust: elucidating how the first oceans and the atmosphere formed on Earth and evolved over the early geological history.

- Figure out when and how the geodynamo, mantle convection and plate tectonics started on Earth, the consequences this entailed for surface conditions and why the evolution of other terrestrial planets was very different.
- Decipher the traces and causes of the major changes in Earth's surface conditions during the Precambrian and identify the first traces of life or organic compounds. ■

FOCUS 1 Une anomalie isotopique du fer unique pour identifier les bactéries magnétotactiques fossiles

Iron isotope signature for identification of fossilized magnetotactic bacteria

Des chercheurs de l'institut de physique du globe de Paris, de l'institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (CNRS, UPMC, IRD, MNHN, Sorbonne Universités), et de la société Nanobactérie ont découvert une anomalie isotopique du fer spécifique aux magnétites synthétisées par les bactéries magnétotactiques. Ces travaux ont été publiés dans la revue *Science*.

Les bactéries magnétotactiques synthétisent, au sein de leur cellule, des chaînes de cristaux nanométriques de magnétite (Fe_3O_4) qui les transforment en aimants et leur permettent de s'aligner suivant les lignes du champ magnétique terrestre. A quel moment de l'histoire de la vie et de la Terre, et dans quelles circonstances, cette capacité de nanofabrication que les nanotechnologies ne sont pas encore parvenues à égaler est-elle apparue ? On manque de traces fossiles identifiables de ces objets dans les archives géologiques anciennes pour répondre à cette question. Lorsque ces bactéries meurent, leur magnétite se dépose bien au sein des sédiments, mais la signature du micro-organisme qui en était à l'origine est très difficilement conservée. Des méthodes reposant sur la structure et les propriétés magnétiques des cristaux ont été proposées de longue date mais n'ont pu, jusqu'à aujourd'hui, apporter de critères dépourvus d'ambiguïté justifiant la recherche de nouveaux marqueurs de ce métabolisme potentiellement très ancien.



Observation en microscopie électronique en transmission de la bactérie magnétotactique *Magnetospirillum magneticum* souche AMB-1. Les cristaux de magnétite (structures foncées, opaques aux électrons) sont organisés en chaînes au sein de la cellule. Transmission electron microscope observation of the magnetotactic bacterium *Magnetospirillum magneticum* strain AMB-1. Magnetite crystals (dark spots) are aligned as chains inside the cell. © Amor et al. *Science*. Picture from Matthieu Amor.

Afin de développer un nouvel outil permettant d'identifier les fossiles de bactéries magnétotactiques, les chercheurs ont mesuré la composition isotopique du fer de cristaux de biomagnétite produits en laboratoire en cultivant une souche bactérienne. Une telle analyse nécessite de produire des quantités relativement importantes de magnétites bactériennes purifiées, et de bien débarrasser les cristaux de la fraction organique les entourant afin d'obtenir leurs compositions isotopiques avec une précision suffisante. Ceci a été possible grâce à la société Nanobactérie, liée à l'IMPMC, qui développe des applications thérapeutiques avec des magnétites bactériennes et doit pour cela répondre à des exigences similaires.

A l'issue de ce travail, une signature isotopique très particulière du fer des bactéries magnétotactiques a été découverte. Rappelons que la principale différence entre deux isotopes d'un même élément est leur différence de masse, les variations isotopiques dans des échantillons naturels étant généralement proportionnelles aux écarts de masse entre les isotopes. Étonnamment, les biomagnétites étudiées se sont révélées enrichies en isotope impair du fer (^{57}Fe) relativement aux isotopes pairs (^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{58}Fe), c'est-à-dire d'une manière dite indépendante de la masse. De telles anomalies avaient déjà été observées pour d'autres éléments chimiques comme le mercure ou le soufre, mais n'avaient jamais été identifiées, dans aucun objet naturel ou artificiel, dans le cas des isotopes du fer.

Le mécanisme d'acquisition de cette signature isotopique très particulière dans les bactéries magnétotactiques reste à élucider mais pourrait être lié aux propriétés électroniques (dites de spin) du fer lors de la synthèse de ces cristaux de magnétite dans les cellules. Au-delà de la découverte d'un nouveau mécanisme de fractionnement des isotopes du fer, ces travaux ont des implications importantes pour l'identification des fossiles de bactéries magnétotactiques dans des échantillons terrestres ou extraterrestres. Des cristaux de magnétite ont par exemple été observés au sein de la météorite martienne ALH84001 et ont été proposés, de façon très controversée, comme ayant été produits par des bactéries magnétotactiques ayant évolué sur Mars. L'analyse de la composition isotopique de ces échantillons devrait permettre de mieux contraindre leur origine réelle. ■

Researchers from the Institut de physique du globe de Paris, the Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (CNRS, UPMC, IRD, MNHN, Sorbonne Universités), and the Nanobactérie company discovered an iron isotope signature specific to magnetite nanoparticles produced by magnetotactic bacteria. These results have been published in *Science*.

Magnetotactic bacteria produce intracellular chains of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles. Magnetite turns bacteria into magnets, and allows them to align along the Earth's magnetic field. When did such a sophisticated biomineralization process (i.e. the capability for living organisms to produce crystals) appear? The lack of reliable magnetotactic bacteria signatures prevents researchers to address this issue. When bacteria die, their magnetite crystals are deposited in sediments, but most features typical of a magnetotactic origin are erased during sediment aging. During the past three decades, magnetic characterizations of fossil magnetite were carried out. The magnetotactic origin of ancient samples could not be unambiguously determined. Therefore, new signatures of magnetotactic bacteria activity are required.

In order to develop new tools for identification of magnetotactic bacteria fossils, the researchers determined iron isotope composition of magnetite crystals produced from magnetotactic bacteria cultures in the laboratory. Significant amounts of magnetite are required to perform such analyses. Moreover, the organic fraction surrounding the magnetic crystals needs to be removed to achieve sufficient precision. This was made possible by the Nanobactérie company, which is elaborating therapeutic applications with bacterial magnetite and thus needs to meet similar requirements.

An isotopic feature characteristic of magnetotactic bacteria was evidenced. The main difference between two isotopes is their different masses. Accordingly, isotopic variations in natural samples are usually proportional to mass differences between isotopes. Surprisingly, magnetite produced by magnetotactic bacteria was enriched in the odd iron isotope (^{57}Fe) but not in even isotopes (^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{58}Fe), corresponding to a process independent of isotope masses. Such anomaly was identified in the past for elements other than iron (sulfur, mercury...). Magnetotactic bacteria represent the first evidence for an iron isotope anomaly.

The underlying biochemical process producing iron isotope anomaly still has to be solved. It could be related to iron electron properties (i.e. spin) during magnetite synthesis. Beyond the discovery of a new isotope enrichment process, this finding will have important implications for identification of fossilized magnetotactic bacteria in terrestrial and extraterrestrial samples. For instance, magnetite nanoparticles were identified in the Martian meteorite ALH84001. Not without controversy, they were proposed to have been produced by magnetotactic bacteria living on Mars. Characterizing their isotope composition should help to determine their origin. ■



M. Amor, V. Busigny, P. Louvat, A. Gélabert, P. Cartigny, M. Durand-Dubief, G. Ona-Nguema, E. Alphandéry, I. Chebbi & F. Guyot, "Mass-dependent and independent signature of Fe isotopes in magnetotactic bacteria", *Science*, vol. 352 no. 6286 705-708 (2016), doi: 10.1126/science.aad7632

La planète Mars a deux petites lunes, Phobos et Deimos. Longtemps, on a cru qu'elles étaient des astéroïdes capturés par Mars. Cependant la forme et l'orientation de leur orbite contredisent cette hypothèse.

Une équipe de recherche belgo-franco-japonaise, menée par Pascal Rosenblatt de l'ORB, suggère dans une étude publiée dans *Nature Geoscience* que Phobos et Deimos se sont formées par accréation des débris éjectés par une collision catastrophique entre Mars et un corps primordial trois fois plus petit. Cette collision pourrait avoir dévasté l'hémisphère Nord de Mars, y effaçant tout relief et imprimé à Mars sa rotation, lui imposant un cycle jour/nuit comme sur Terre. Le mécanisme nécessite que Mars ait possédé dans le passé d'autres lunes aujourd'hui disparues, qui ont rassemblé les débris pour former Phobos et Deimos. Le scénario proposé permet de comprendre pourquoi Mars a deux lunes et non une seule comme la Terre.

Ce travail ouvre la voie à de nouvelles recherches sur la formation du système martien et plus généralement sur la formation des lunes dans le système solaire et les systèmes extra-solaires.

De nouvelles observations permettront bientôt d'en savoir plus. En effet, l'agence spatiale japonaise JAXA prévoit de lancer une mission de retour d'échantillons de la surface de Phobos en 2022. De même, l'agence spatiale européenne ESA, en association avec l'agence spatiale russe Roscosmos, prévoit une mission similaire en 2024. ■



Vue d'artiste de Mars violemment percutée par une proto-planète trois fois plus petite. En quelques heures, un disque de débris se forme.
Artist's concept of the giant collision between Mars and proto-planet three times smaller. A couple of hours after, a disk of debris formed.
© Labex UnivEarthS

The planet Mars has two small moons, Phobos and Deimos. For a long time, we believed that they were asteroids captured by Mars. However the shape and the orientation of their orbit contradict this hypothesis.

A team of Belgian, French and Japanese scientists, led by Dr Pascal Rosenblatt at the Royal Observatory of Belgium, suggests in a article published in *Nature Geoscience* that Phobos and Deimos formed by accretion of debris following a giant collision between Mars and a primitive body three times smaller. This collision may have erased the surface of the northern hemisphere of Mars, as well as imparted to Mars its rotation, yielding to Mars the same Earth diurnal cycle. The mechanism requires that Mars once had additional, henceforth lost moons, which have appropriately assembled the debris to form Phobos and Deimos. The proposed scenario explains why Mars has two moons instead of one like Earth.

This work paves the way to new studies on the formation of the Martian moon system and, more generally, on the formation of moons in solar and extra-solar systems.

New insights can be expected in a close future. The Japanese space agency JAXA is planning a sample return mission to Phobos for 2022. The European and Russian space agencies ESA and Roscosmos are also planning a similar mission for 2024. ■



P. Rosenblatt, S. Charnoz, K. M. Dunseath, M. Terao-Dunseath, A. Trinh, R. Hyodo, H. Genda & S. Toupin, "Accretion of Phobos and Deimos in an extended debris disc stirred by transient moons", *Nature Geoscience* 9, 581–583 (2016), doi: 10.1038/ngeo2742

Au tout début de son histoire, la Terre était physiquement et chimiquement très différente d'aujourd'hui. Elle se caractérisait par un océan et une atmosphère anoxiques, un flux de chaleur plus élevé et devait subir un rayonnement UV solaire et un bombardement météoritique plus intenses. Malgré ces conditions extrêmes, il y a de plus en plus de preuves qui montrent que la vie a pu se développer dès la fin de l'ère hadéenne et que des métabolismes microbiens ont pu être présents il y a 3,7 - 3,8 milliards d'années.

Bon nombre des avancées remarquables dans notre compréhension de l'habitabilité précoce de la Terre et de l'évolution de la vie proviennent d'observations faites sur des échantillons de carottes de forage frais, peu ou pas altérés par les processus d'altération de subsurface. Comparés à l'échantillonnage de surface, les échantillons de forage ont l'avantage supplémentaire de fournir une information stratigraphique continue qui apporte une dimension temporelle essentielle lors des corrélations entre bassins sédimentaires. Au cours de la dernière décennie, 10 programmes de forage scientifique soutenus par des agences nationales et internationales ont été développés. Ceux-ci incluent :

Pilbara Craton, Australie occidentale

- Archean Biosphere Drilling Project (2003, NAI, piloté par H. Ohmoto)
- Deep Time Drilling Project (2004, NAI, piloté par R. Buick)
- Pilbara Drilling Project (2004, IPGP, piloté par P. Philippot)
- Dixon Island-Cleaverville Drilling Project (2008, TIT, piloté par K. Yamaguchi)
- Australian Drilling Program (2011, Agouron Institute, piloté par R. Buick)
- Turee Creek Drilling Project (2013, IPGP, Labex UnivEarths, piloté par P. Philippot)

Kaapvaal Craton, Afrique du Sud

- Kaapvaal Drilling Project (2006, Agouron Institute, piloté par N. Beukes)
- Barberton Barite Drilling Project (2008, IPGP, piloté par P. Philippot)
- Barberton Drilling Project (2011, ICDP piloté par N. Arndt)

Fennoscandian Craton, Russie

- FAR-DEEP project (2007, ICDP piloté par V. Melezhik)

Parmi ceux-ci, l'IPGP était l'organisateur principal de trois d'entre eux. Depuis 2004, l'effort s'est porté sur :

During the early stages of its history, the Earth was physically and chemically very different from today. It was characterized by an anoxic ocean and atmosphere, higher heat flow, higher solar UV flux to the surface, and most likely, stronger meteorite bombardment. Despite these extreme conditions, there is a growing body of evidences that early life may have emerged by the end of the Hadean eon and that advanced metabolisms may have evolved as early as 3.7 to 3.8 Ga ago.

Many of the remarkable advances in our understanding of the early habitability on Earth and earliest evolution of life comes from obtaining fresh, chemically unmodified samples from the subsurface using diamond core drilling. Compare to surface sampling, drilling, if done carefully, has the added advantage of providing continuous petrological information with depth, not otherwise seen on surface as a result of typically sparse and discontinuous outcrop. During the last decade, 10 scientific drilling programs supported by national and international agencies have been developed. These include:

Pilbara Craton, Western Australia

- Archean Biosphere Drilling Project (2003, NAI, led by H. Ohmoto)
- Deep Time Drilling Project (2004, NAI, led by R. Buick)
- Pilbara Drilling Project (2004, IPGP, led by P. Philippot)
- Dixon Island-Cleaverville Drilling Project (2008, TIT, led by K. Yamaguchi)
- Australian Drilling Program (2011, Agouron Institute, led by R. Buick)
- Turee Creek Drilling Project (2013, IPGP, Labex UnivEarths, led by P. Philippot)

Kaapvaal Craton, South Africa

- Kaapvaal Drilling Project (2006, Agouron Institute, led by N. Beukes)
- Barberton Barite Drilling Project (2008, IPGP, led by P. Philippot)
- Barberton Drilling Project (2011, ICDP directed by N. Arndt)

Fennoscandian Craton, Russia

- FAR-DEEP project (2007, ICDP directed by V. Melezhik)

Among these, IPGP was Principal Organizer of 3 of them. Since 2004, effort has been focused on:

- 1) the period between 3.2 and 3.5 Ga, which preserves the only known relic testimony of Archean sedimentary sulfate (PDP2, BBDF)
- 2) the period between 2.8 and 2.45 Ga, which is characterized by a variety of global anomalies (negative carbon isotope excursion of the Fortescue) and during which possible "whiffs" of free oxygen may have been released to the atmosphere (PDP1)
- 3) the period between 2.45 and 2.2 Ga associated with the Great Oxidation Event (GOE), which is resulted in the irreversible and permanent oxygenation of our planet (TCDFP).

- 1) la période entre 3.2 et 3.5 Ga, qui conserve le seul témoignage relique connu de sulfate sédimentaire archéen (PDP2, BBDP)
- 2) la période comprise entre 2.8 et 2.45 Ga, caractérisée par une variété d'anomalies globales (excursion isotopique négative du Fortescue) et au cours de laquelle de possibles "bouffées" d'oxygène libre ont pu être relâchées dans l'atmosphère (PDP1)
- 3) la période entre 2.45 et 2.2 Ga associée à la Grande Oxydation (Great Oxidation Event, GOE), qui s'est traduit par l'oxygénation irréversible et permanente de notre planète (TCDP).

Notre objectif de recherche principal a été de mieux comprendre les liens entre l'augmentation de la vie microbienne au début de la Terre (entre 3,8 et 2,2 milliards d'années) et l'évolution de l'environnement (notamment les compositions océaniques et atmosphériques et les propriétés redox). Cet objectif a impliqué des investigations de : (1) géologie, minéralogie et géochronologie (U-Pb, Re-Os), (2) microfossiles, macrofossiles et tapis microbiens (stromatolites) à différentes échelles en utilisant une variété de techniques de haute résolution à l'IPGP et au niveau national (SIMS, nanoSIMS, SOLEIL, ESRF...), (3) études biogéochimiques de carottes de forage via des études intégrées couplant analyses des éléments traces et isotopes stables (C, N, S, O, Fe, Cd, Mo, Cr, U), (4) reconstitution paléomagnétique sur échantillons de carottes orientés et datés et (5) la diversité des micro-organismes vivant dans des carottes de forage sélectionnées afin d'évaluer le rôle potentiel de la contamination de la vie moderne sur les biomarqueurs et la signature des isotopes stables.

La disponibilité et la proximité d'un ensemble de techniques et d'équipes scientifiques à l'IPGP dans des disciplines différentes ont permis de mettre en oeuvre une collaboration étroite ainsi qu'un programme de sensibilisation du grand public. La collection de carottes en notre possession a également inspiré un certain nombre de collaborations tant au niveau national (Nancy, Brest, Dijon, Lille, Clermont-Ferrand) qu'à l'international (ANU, Yale and Curtins Universities, and the Universities of Alberta, Sydney, Western Australia, New South Wales...). Cela a également permis d'attirer de nombreux doctorants et postdoctorants français et étrangers d'Allemagne, du Canada, de Chine, des Etats-Unis, d'Espagne et d'Uruguay.

Les principales réalisations de notre recherche comprennent de manière non exhaustive :

- (1) la reconnaissance de l'importance de certaines réactions photochimiques spécifiques dans la composition chimique de l'atmosphère et de l'océan avant environ 2,3 milliards d'années (augmentation épisodique de sulfate non-associé de l'altération continentale) ;
- (2) le développement d'un modèle



Site de forage du Pilbara Drilling Project, formation de Tumbiana datée à 2,74 milliards d'années, Australie occidentale.
Drilling site of the Pilbara Drilling Project, 2.74 Ga old Tumbiana formation, Western Australia © IPGP

Our primary research goal has been to increase understanding of the connections between the rise of microbial life during the early history of Earth (between ~3.8 and 2.2 billion years ago) and the evolution of the environment (especially ocean and atmosphere compositions and redox properties). This goal has involved investigations of: (1) geology, mineralogy and geochronology (U-Pb, Re-Os), (2) microfossils, macrofossils and microbial mats (stromatolites) at different scales using a variety of high-resolution techniques at IPGP and national facilities (SIMS, nanoSIMS, SOLEIL, ESRF...), (3) biogeochemical investigations of drill cores using trace element and C, N, S, O, Fe, Cd, Mo, Cr, U stable isotope systematics, (4) paleomagnetic reconstructions made possible owing to systematic orientations of drill cores, and (5) diversity of living micro-organisms in selected drill core samples in order to evaluate the potential role of modern life contamination on biomarkers and stable isotope signatures.

The availability at IPGP of a wide range of techniques and the proximity of different scientific groups representing a wide range of disciplines has enabled close interaction and a variety of collaborative research and public outreach programs. The collection of drill cores in our possession also emulated a number of collaboration both at the national (Nancy, Brest, Dijon, Lille, Clermont-Ferrand) and the international (ANU, Sydney University, Yale University, and the Uni-

- versities of New South Wales, Western Australia, Alberta...) scale. It also attracted a numbers of French and foreign PhD students and Postdoctorate Fellows from Canada, Uruguay, Germany, China, Spain and USA.
- biologique / atmosphérique pour expliquer l'excursion négative exceptionnelle des isotopes du carbone il y a 2,7 Ga ;
- (3) un nouveau modèle pour expliquer l'augmentation de l'O₂ atmosphérique couplée à des événements glaciaires de grande ampleur entre 2.45 et 2.2 Ga ;
- (4) des contraintes nouvelles sur la chimie et la pression partielle de l'azote de l'atmosphère archéenne primitive ;
- (5) la découverte de témoins d'aragonite microscopiques d'origine biologique dans des cellules microbiennes fossiles individuelles de 2,7 milliards d'années ;
- (6) l'utilisation des isotopes du fer comme nouveaux traceurs de premières traces de vie ;
- (7) la mise en évidence du rôle majeur du cycle de l'As dans l'évolution de la vie sur la Terre primitive. ■

versities of New South Wales, Western Australia, Alberta...) scale. It also attracted a numbers of French and foreign PhD students and Postdoctorate Fellows from Canada, Uruguay, Germany, China, Spain and USA.

Important accomplishments from our research include, but are not restricted to: (1) recognition of the importance of specific photochemical reactions in controlling atmospheric and oceanic chemistry (episodic sulfate increase) prior to ~2.3 billion years ago (Ga); (2) development of a biological/atmospheric model for the exceptional negative excursion of carbon isotopes 2.7 Ga ago; (3) introduction of a new hypothesis for the rise of atmospheric O₂ and glaciation between 2.45 and 2.2 Ga; (4) novel insights on the chemistry and partial pressure of nitrogen of the early Archean atmosphere (5) discovery of the oldest (2.7 Ga) remnant of aragonite in individual fossil microbial cells; (6) novel insights into Fe-isotope systematics as a new proxy for tracking early traces of life; (7) recognition of the important role of the As cycle in the evolution of the environment and life on early Earth. ■



Segments de carotte de forage. Formation ferrifère rubanée de la Boolgeeda Iron Formation datée à 2,45 milliards d'années, Hamersley Group, Australie occidentale.
Banded iron drill core samples of the 2.45 Ga old Boolgeeda Iron Formation, Turee Creek Group, Western Australia. © IPGP



K. Lepot et al., "Microbially-influenced formation of 2,724 million-years old stromatolites", *Nature Geoscience* 1, 118 - 121 (2008), doi: 10.1038/ngeo107

B. Marty et al., "Nitrogen isotopic composition and partial pressure in the Archean atmosphere from analysis of pristine inclusion fluids", *Science* 342, 101-104 (2013), doi: 10.1126/science.1240971

E. Muller et al., "Multiple sulfur-isotope signatures in Archean sulfates and their implications for the chemistry and dynamics of the early atmosphere", *Proc. Nat. Acad. Sci.* 113, 7432-7437 (2016), doi: 10.1073/pnas.1520522113

P. Philippot et al., "Early Archean microorganisms preferred elemental sulfur, not sulfate", *Science* 317, 1534-1535 (2007), doi: 10.1126/science.1145861

P. Philippot et al., "Variations in atmospheric sulphur chemistry on early Earth linked to volcanic activity", *Nature Geoscience* 5, 668-674 (2012), doi: 10.1038/ngeo1534

M. Pujol et al., "Argon isotopic composition of Archean atmosphere probes early Earth geodynamics", *Nature* 498, 87-90 (2013), doi: 10.1038/nature12152

M-C. Sforza et al., "Evidence for arsenic metabolism and cycling by microorganisms 2.7 billion years ago", *Nature Geoscience* 7, 811-815 (2014), doi: 10.1038/ngeo2276

Observatoires Observatories



Observatoire magnétique de Chambon-la-Forêt (Loiret, France).
Magnetic observatory of Chambon-la-Forêt (Loiret, France). © IGP

Observatoires magnétiques Magnetic observatories

La mission du service d'observatoires magnétiques de l'IPGP est de fournir des données d'observations géomagnétiques et des données traitées de très haute qualité. Composante du bureau central de magnétisme terrestre (BCMT), il est un service national d'observation (SNO) du CNRS-INSU. Il collabore étroitement avec deux institutions françaises et huit institutions internationales. Il compte 11 observatoires à travers le monde incluant l'observatoire national français de Chambon-la-Forêt, celui d'Addis-Abeba en Ethiopie, Borok en Russie, Dalat et Phu Thuy au Vietnam, Kourou en Guyane, Lanzhou en Chine, M'bour au Sénégal, Pamatai en Polynésie française, Tamanrasset en Algérie et sur l'île de Paques au Chili. Un douzième observatoire est actuellement en construction. Ces observatoires magnétiques font partie du réseau d'observation géomagnétique international INTERMAGNET et sont très fiables sur le long terme. Les données magnétiques fournies par les observatoires se classent principalement en 3 catégories : temps quasi réel, données quasi définitives, données définitives moyennées sur une seconde, une minute ou sur des périodes plus longues. Ces données sont diffusées en libre accès sur le site du BCMT (bcmt.fr) ; celui d'INTERMAGNET (intermagnet.org) et sur des DVD INTERMAGNET pour les données définitives ; ainsi que via les World Data Centres (WDC) pour le géomagnétisme localisé au Royaume-Uni, aux Etats-Unis et au Japon (ex : www.wdc.bgs.ac.uk). ■

The mission of the IPGP's service of magnetic observatories is to provide ground-based geomagnetic observations and derived data products of the highest quality. The service is a component of the "bureau central de magnétisme terrestre" (BCMT) appointed as "service national d'observation" (SNO) of the CNRS-INSU. The service is operating 11 observatories worldwide including the French national observatory of Chambon-la-Forêt, Addis-Abeba in Ethiopia, Borok in Russia, Dalat and Phu Thuy in Vietnam, Easter Island in Chile, Kourou in Guyana, Lanzhou in China, M'bour in Senegal, Pamatai in French Polynesia, Tamanrasset in Algeria, in collaboration with 2 French and 8 international institutions. A twelfth observatory is under construction. These observatories are part of INTERMAGNET, an international geomagnetic observation organisation. They combine a high level of consistency and robustness in their long-term operations. The magnetic data provided by the observatories consist mainly of three categories: near real-time raw data, quasi-definitive data and definitive data. They are distributed either as 1-second data or 1-minute, or longer period, means. These data are freely available and currently distributed through: BCMT web site (bcmt.fr); INTERMAGNET web site (intermagnet.org); World Data Centres (WDC) for Geomagnetism located in UK, US and Japan (e.g www.wdc.bgs.ac.uk). ■

» Retour sur 2016-2017 / Back to 2016-2017

- Réhabilitation de l'observatoire magnétique national français de Chambon-la-Forêt (CLF) : la cave d'origine dans laquelle le capteur était installé (construction de l'observatoire en 1935) a dû être abandonnée du fait d'importantes et fréquentes infiltrations d'eau. Deux nouveaux bâtiments sont complètement opérationnels depuis février 2016. Un nouveau logiciel a été développé pour combiner plus efficacement les données issues de différents instruments disponibles sur le site, sécurisant ainsi le recueil des données en quasi temps réel. La nouvelle configuration est pleinement opérationnelle depuis juin 2016.
- Consolidation des observatoires BCMT existants : la consolidation de plusieurs observatoires a été réalisée sous la responsabilité de l'IPGP. L'ensemble des instruments et de la chaîne d'acquisition de l'observatoire de Phu Thuy ont été réinstallés en 2016 et 2017. Des travaux de maintenance ont été effectués à Dalat en 2017. Le système d'acquisition de l'observatoire de BOX a également été mis à jour en juillet 2016.

D'importants travaux de maintenance ont été réalisés au sein de l'observatoire de Kourou pour sécuriser l'infrastructure contre les feux de brousse. Le système d'étalonnage de l'observatoire de l'île de Paques a été réinstallé fin novembre 2016. Finalement, en 2017, une visite préparatoire pour la réouverture de l'observatoire national du Liban a été organisée.

- Sauvetage d'observatoires BCMT en Afrique : un site à Edéa, au Cameroun, a été choisi pour l'installation d'un observatoire magnétique afin de remplacer celui de Bangui (République centrafricaine) fermé depuis 2011. Un accord a été signé en 2012 entre l'IPGP et l'institut de recherche géologique et minière du Cameroun. La construction de l'observatoire a commencé en 2017. Des données scalaires ont été enregistrées en continu depuis.

- Réseau de stations de répétition : le réseau français de 12 stations de répétition a été entièrement relevé en 2017. Les données sont en cours de traitement. ■

- Reconstruction of the French national magnetic observatory at Chambon-la-Forêt (CLF): the original sensor vault of the CLF observatory (built in 1935) had to be vacated because of water infiltrations. Three new sensor pavilions are fully operational since February 2016. New software has been

developed to combine efficiently data from different instruments available on site, securing this way the provision of near real-time data. The new setup is fully operational since June 2016.

- Consolidation of existing BCMT observatories: consolidation work has been done on several observatories under the responsibility of IPGP. This includes re-installing all instruments and acquisition chain in Phu Thuy in 2016 and 2017, maintaining Dalat observatory in 2017, upgrading the acquisition system in Borok observatory over July 2016, re-setting the calibration set up in Easter Island end of 2016, and finally securing against bushfires the infrastructure of the Kourou observatory in 2016. Preparation work has also been done in Lebanon in 2017 in view of re-opening the national observatory.

- Rescuing of BCMT observatories in Africa: a site at Edéa, Cameroon has been selected for the installation of a magnetic observatory to replace Bangui (Central African Republic) observatory closed since 2011. An agreement has been signed in 2012 between IPGP and the Cameroon's institut de recherche géologique et minière. Building works have started in November 2017. First scalar data have been acquired since that date.

- French national repeat station survey: the full French network of 12 repeat stations was surveyed over spring 2017. Data are being processed. ■

The mission of GEOSCOPE is to provide validated, high quality broadband seismic data to the French and international seismological communities. The GEOSCOPE observatory currently runs 34 seismic stations, all of which are now equipped to provide (near) real-time data. The GEOSCOPE observatory is primarily dedicated to research and its data are used for studies of Earth structure and dynamics, seismic sources, time dependent seismology and environmental seismology. GEOSCOPE also provides real-time data to earthquake detection and tsunami warning centers worldwide. GEOSCOPE is an observatory jointly run by IPGP in Paris and EOST in Strasbourg. A majority of stations is maintained by IPGP (25 stations) and the data validation and distribution is done through the IPGP data center, with data also available through RESIF and IRIS data centers. Data are extensively used by the scientific community (about 1300 publications with explicit mention to GEOSCOPE since 1982, see GEOSCOPE website), and also inside the observatory which provides data products, such as the rapid estimation of earthquake source parameters (catalog available on the GEOSCOPE website). ■



Station GEOSCOPE de M'bour, Sénégal (MBO).
GEOSCOPE station of M'bour, Senegal (MBO). © IPGP, CNRS

Observatoire GEOSCOPE GEOSCOPE observatory

La mission de GEOSCOPE est de fournir des données sismologiques large bande validées, de haute qualité, aux communautés sismologiques françaises et internationales. GEOSCOPE est constitué d'un réseau de 34 stations sismologiques, toutes équipées pour fournir des données en temps (quasi) réel. GEOSCOPE est en premier lieu dédié aux travaux de recherche : ses données sont ainsi utilisées pour l'étude de la structure et de la dynamique terrestre, pour l'étude des sources sismiques, pour le suivi temporel des phénomènes de déformation ou encore pour la sismologie environnementale. L'observatoire fournit également des données en temps réel aux organismes d'alerte des séismes et des tsunamis partout dans le monde. GEOSCOPE est géré conjointement par l'IPGP à Paris et par l'EOST à Strasbourg. La plupart des stations sont entretenues par l'IPGP (25 stations), son centre de données effectuant la validation et la distribution de celles-ci, lesquelles sont également disponibles via les centres RESIF et IRIS. Ces données sont largement utilisées par la communauté scientifique (environ 1300 publications mentionnent explicitement GEOSCOPE depuis 1982, liste disponible sur le site de GEOSCOPE), mais également par l'observatoire lui-même afin de fournir des analyses telles que l'estimation rapide des paramètres de sources d'un tremblement de terre (catalogue disponible sur le site). ■



Station GEOSCOPE d'Ivituut, Groenland (IVI).
GEOSCOPE station of Ivituut, Groenland (IVI). © IPGP, CNRS



Station GEOSCOPE de Sao Paulo, Brésil (SPB).
GEOSCOPE station of Sao Paulo, Brazil (SPB). © IPGP, CNRS

Retour sur 2016-2017 / Back to 2016-2017

- Installation ou réinstallation de plusieurs stations : en 2016, nouvelle station à Wallis et Futuna (FUTU) et réinstallation de deux capteurs sur un très bon site dans l'Ouest de la Chine (WUS). En 2017, réinstallation complète de la station FOMA à Madagascar.

- Maintenance et amélioration de la chaîne complète allant de l'instrumentation jusqu'à la distribution des données, avec pour ce dernier point la finalisation de l'accès aux données par le centre national RESIF.

- Amélioration du protocole de vérification de la qualité des données par la comparaison (pour chaque séisme bien enregistré à l'échelle globale) entre données observées et données simulées.

- Amélioration de la diffusion des produits dérivés mis en place par l'observatoire, en particulier concernant les informations sur les séismes récents.

- Ces activités ont pour but plus général de suivre des évolutions récentes des analyses en sismologie :
1/ Utilisation de quantités de données toujours plus importantes, à la fois dans le temps et l'espace (par exemple pour les analyses du bruit).
2/ Nécessité d'une réactivité accrue aux tremblements de terre.

Avec dans les deux cas un intérêt tout particulier pour les zones où les stations sont clairsemées. L'objectif à court et long termes est ainsi de maintenir cette qua-

lité d'observation tout en augmentant légèrement le nombre de stations, en particulier dans les zones peu instrumentées. ■

- Installation or re-installation of several stations: in 2016, a new station was installed in Wallis and Futuna (FUTU) and two broadband sensors were re-installed in a very good site of Western China (WUS). In 2017, the station FOMA in Madagascar has been completely re-installed.

- Maintenance and improvement of the complete chain from the seismic station to the data distribution, which now includes the distribution of the data by the RESIF national data center.

- Improvement of the data quality monitoring by the regular validation (for each earthquake well recorded at the global scale) of the observed waveforms compared to the expected waveforms.

- Improvement of the diffusion of the data products, in particular for the information about recent earthquakes.

- These activities are more globally related to the evolution of the analyses in seismology in the last years:

- 1/ Using increasing amounts of continuous data, both in space in time (for example for noise analyses).

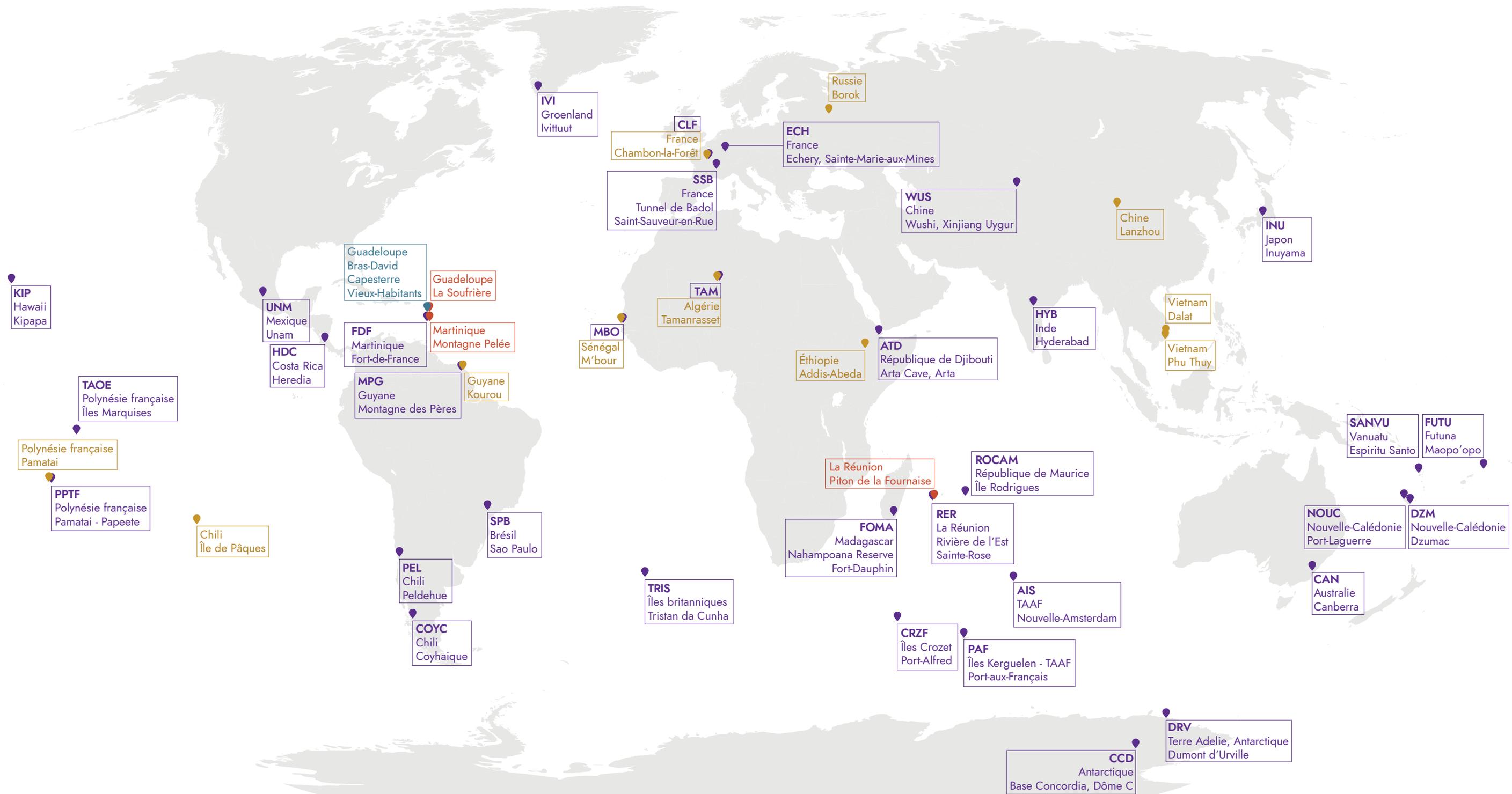
- 2/ Being more and more reactive to the earthquakes.

In both cases with a special interest for the places where high-quality station distribution is sparse. The project in the short and long terms is therefore to maintain this quality of the continuous observations and to increase slightly the number of stations in poorly instrumented places of the Earth. ■

Réseau international des observatoires de l'IPGP

International network of IPGP observatories

- Observatoires volcanologiques et sismologiques / *Volcanological and seismological observatories*
 - Observatoires magnétiques / *Magnetic observatories*
 - Stations GEOSCOPE / *GEOSCOPE stations*
 - Observatoire OBSERA / *OBSERA observatory*
- En partenariat avec / *In partnership with* :
 L'école et observatoire des sciences de la Terre (EOST)



Observatoire OBSERA

OBSERA observatory

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



Installation d'un instrument de mesure des flux de matière en suspension sur la rivière de Capesterre.
Deployment of a suspended sediment sensor in the Capesterre river.
© OBSERA, IGP

The observatory of erosion in the Antilles (OBSERA) monitors the evolution of environmental variables (e.g. rainfalls, river discharge, conductivity, suspended load, chemical composition of soils, rivers and precipitations...) in 4 catchments located on Basse-Terre Island, a volcanic island of the Guadeloupe archipelago (Lesser Antilles arc). OBSERA also monitors the granulometry and the morphology of several river reaches using drone-acquired aerial images and a terrestrial lidar. The objectives of OBSERA are : to investigate chemical and physical erosion, their feedbacks and their influence on the carbon and water cycles and the environment in the peculiar context of a tropical volcanic island; to promote the development of new instruments and methods for monitoring sediment transport by rivers and slope processes and characterizing the ecosystem dynamics; to investigate how extreme events (floods induced by heavy rains and tropical storms, earthquakes...) influence geochemical cycles (e.g. carbon cycle), denudation rates and landscape morphology. OBSERA participates to the Network of Drainage Basins (SOERE-RBV). OBSERA is also involved in the creation of the Very Large Research Infrastructure (TGIR) OZCAR. The data from OBSERA are made freely available to the scientific community on the web site: <https://morpho.ipgp.fr/obsera> ■



Calibration d'une station météorologique sur le bassin de la rivière de Capesterre.
Calibration of a weather station in the Capesterre catchment.
© OBSERA, IGP



Installation d'un canal Venturi pour la mesure des flux dans la ravine Quiock.
Deployment of a Venturi channel to monitor the discharge of the Quiock creek. © OBSERA, IGP

Retour sur 2016-2017 / Back to 2016-2017

Les principaux résultats ont été publiés dans 2 articles :

- En utilisant les isotopes du Sr et du Nr, nous avons montré que les dépôts de poussière saharienne sont la principale source de nutriments des écosystèmes au sein de la forêt tropicale de Guadeloupe (Clergue et al.). Nous poursuivons cette étude en échantillonnant les dépôts atmosphériques humides et secs afin d'étudier l'influence des sables/poussières du Sahara sur les écosystèmes tropicaux et la dynamique des sols (thèse d'Yangjunjie XU, 2016-présent).

- L'analyse des données d'OBSERA montre que la nappe phréatique et le débit des rivières réagissent simultanément lors d'un épisode de pluie. Elle montre également que le débit des rivières augmente de manière non linéaire avec le taux de précipitations (Guérin et al., 2014).

- Grâce à des images haute résolution acquises par un drone, nous avons montré que le transport de sédi-

ments dans les rivières se produit uniquement pendant les événements météorologiques extrêmes. ■

The main results are published in 2 articles:

- Sr and Nr isotopes measurements show that saharan dust deposits are the major source of nutrients in ecosystems evolving on highly weathered soils (Clergue et al.). Because the saharan dust influence is major in the Lesser Antilles arc, we recently started to sample humid and dry atmospheric deposits to investigate the influence of saharan dust on tropical ecosystems and soil dynamic (Yangjunjie XU thesis, 2016-present).

- The analysis of OBSERA data shows that the water table and the river discharge evolve simultaneously during rainfall and confirms that the river discharge increases non-linearly with the rainfall rate (Guérin et al., 2014).

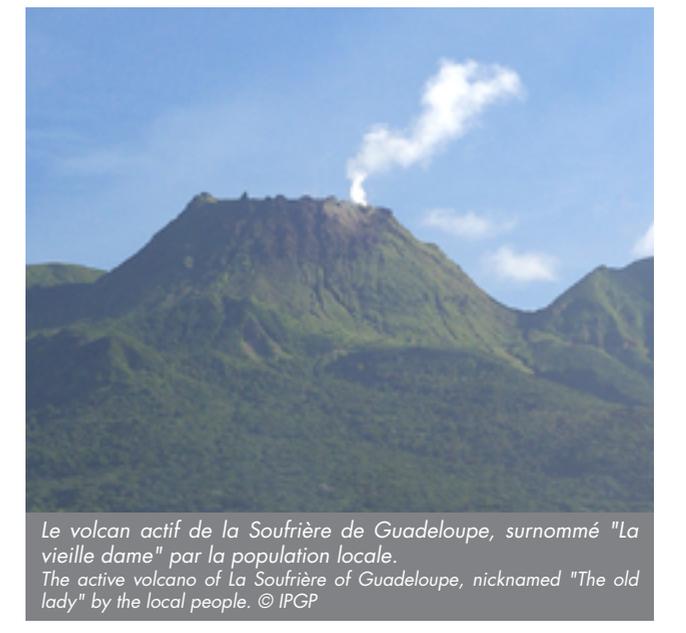
- Using high-resolution images acquired by a drone, we monitor the evolution of the sediment-size distribution in several rivers since 2011. Our data confirm that sediment transport occurs only during extreme meteorological events. ■

Observatoires volcanologiques et sismologiques

Volcanological and seismological observatories

L'IPGP est en charge de la surveillance des trois volcans actifs français d'outremer (la Soufrière de Guadeloupe, la Montagne Pelée à la Martinique et le Piton de la Fournaise à la Réunion) ainsi que celle de la sismicité régionale, incluant la formation potentielle de tsunamis. Les observatoires volcanologiques et sismologiques (OVSG, OVSM et OVPF) de l'IPGP ont vocation à collecter des données géologiques, géophysiques et géochimiques sur le long terme pour nourrir les recherches qui visent à comprendre le fonctionnement des volcans et leur contexte géologique. Les équipes scientifiques des observatoires mettent également à disposition des autorités locales responsables de la réduction des risques telluriques leur expertise et leur envoient des rapports d'activité réguliers. Ces dernières années, les observatoires antillais, en collaboration avec le UWI Seismic Research Centre (University of the West Indies SRC), ont modernisé leurs réseaux de surveillance (sismologie et déformation) en s'équipant de moyens de communication par satellite pour le transfert des données en temps réel. Le réseau global du consortium IPGP-SRC couvre ainsi l'ensemble de l'arc antillais et permet d'alimenter le système d'alerte aux tsunamis aux Caraïbes supporté par l'UNESCO. En 2017, l'OVSM a obtenu le financement d'un projet européen de 4 M€ (Interreg – PREST) pour commencer à étendre son réseau de surveillance en mer. Les observatoires travaillent en étroite collaboration avec le

centre de données de l'IPGP pour diffuser les données sismologiques et volcanologiques à la communauté scientifique à travers des centres de données nationaux et internationaux (RESIF, FDSN-IRIS-DMC). Ils sont également engagés au sein d'EPOS (TCS volcano), qui définit des standards de données et méta-données pour les distribuer via un portail dédié aux sciences de la Terre à l'échelle de l'Europe. ■



Le volcan actif de la Soufrière de Guadeloupe, surnommé "La vieille dame" par la population locale.
The active volcano of La Soufrière of Guadeloupe, nicknamed "The old lady" by the local people. © IGP

The Institut de physique du globe de Paris is in charge of the monitoring of the three active volcanoes located in the French overseas territories (La Soufrière of Guadeloupe, Montagne Pelée in Martinique, Piton de la Fournaise in La Réunion) as well as the permanent regional seismicity including the potential formation of associated tsunamis. The volcanological and seismological observatories (OVSG, OVSM and OVPF) of IPGP are dedicated to collecting geological, geophysical and geochemical data over long periods of time to feed research with the aims of understanding the functioning of volcanoes and their geological contexts. Scientific teams from observatories also provide expertise and send activity reports to the local authorities in charge of telluric risk mitigation. In the last few years, the French West Indies observatories in collaboration with the UWI Seismic Research Centre (University of the West Indies SRC), have modernized the Lesser Antilles arc seismic and deformation monitoring networks with satellite communication for real-time data transfer. The global network of the IPGP-SRC consortium covers the whole Antilles arc and feeds the Caribbean Tsunami Warning System supported by UNESCO. In 2017, OVSM got a 3 years program of 4 M€, co-funded by Europe (Interreg – PRET), to start extending the current network to the ocean. The observatories have a strong collaboration with the IPGP Data Center to disseminate volcanological and seismological data to the scientific community via national and international data centres (RESIF, FDSN-IRIS-DMC). They are also working within the EPOS framework to harmonise data and meta-data standards at European level. Moreover volcano observatories are associated to the networking project (EUROVOLC) in volcanology to be more integrated to European volcanological community. ■

Retour sur 2016-2017 / Back to 2016-2017

- Au total, les trois observatoires opèrent un réseau géophysique de 86 stations sismologiques et 50 stations GNSS (système de navigation globale par satellite), qui transmettent leurs données en temps réel ou quasi-réel. En 2016, un nouveau spectromètre quadripolaire a été installé à l'OVSG pour l'analyse des gaz volcaniques. Au mois de décembre 2016, l'OVSG a lancé l'installation de trois stations automatiques multi-gaz permanentes (CO_2 , H_2S , SO_2 , H_2O) au sommet de la Soufrière. En novembre 2016, les 8^e journées scientifiques et techniques du RAP (Réseau Accélérométrique Permanent) ont été organisées pour la première fois en Guadeloupe. L'OVSG était partenaire et co-organisateur de la conférence.

- Les observatoires fournissent des bulletins d'information sur l'activité volcanique et la sismicité à la population, aux autorités et aux médias (OVSG : rapports mensuels ; OVPF : rapports mensuels et quotidiens ; OVSM : rapports trimestriels). L'an dernier, l'OVSG et l'OVSM ont identifié 7 038 séismes, dont 4 201 aux Antilles, la plupart faisant partie des répliques associées au tremblement de terre régional de magnitude Mw 6.3 qui a eu lieu au large des Saintes le 21 novembre 2004. 37 bulletins de séismes ressentis ont été envoyés aux autorités locales de Guadeloupe et de Martinique. La Soufrière de Guadeloupe montre des signes de dégazage et une augmentation du flux thermique dans des zones sommitales et des fuméoles. Dans le contexte de l'anniversaire des 40 ans de l'éruption magmato-phréatique de 1976 de la Soufrière, l'observatoire de Guadeloupe a participé à de nombreuses commémorations et activités d'information et de prévention auprès du public. En octobre 2016, l'IPGP a organisé une prospective scientifique pour faire le point sur l'état actuel des connaissances sur le volcan de la Soufrière de Guadeloupe. En Mars 2017, les observatoires antillais et les équipes de l'IPGP à Paris ont participé aux exercices Richter et

Caribe Wave pour éprouver leurs réponses face à un séisme majeur tel que celui de 1843 au Nord-Est de la Guadeloupe.

- En 2016, l'observatoire du Piton de la Fournaise a géré deux éruptions de courte durée localisées dans la caldera de l'enclos Fouqué, une zone inhabitée visitée chaque année par 220 000 personnes. Il a enregistré 11 375 séismes, en a localisé 2 388 et envoyé 25 rapports d'activité aux autorités locales. L'observatoire a enregistré, via ses réseaux géophysiques et géochimiques, la présence d'un magma profond discontinu alimentant de nouveau le réservoir le moins profond tout au long de l'année 2016. L'observatoire de la Réunion a un programme d'échange avec son homologue hawaïen et collabore avec l'observatoire de la Terre de Singapour (EOS). Dans ce cadre, un sismologue et deux ingénieurs de l'observatoire y sont partis en 2016 pour y mener des recherches conjointes.

- L'observatoire volcanologique historique de la Martinique a été construit en 1936. Ne respectant pas les normes actuelles parasismiques, la collectivité territoriale de Martinique a décidé de reconstruire un observatoire moderne il y a 10 ans ; il sera livré en 2018. Le projet de ce nouvel observatoire vise à créer une plateforme caribéenne de recherche et d'étude en sciences de la Terre en renforçant ses collaborations avec ses partenaires des Caraïbes (Cuba, Haïti, Trinidad) et en développant de nouveaux instruments marins.

- Ouragans Irma et Maria : en septembre 2017, deux ouragans de catégories 5 ont frappé l'arc des Petites Antilles pour la première fois depuis 1850. Irma fut l'ouragan le plus violent jamais enregistré en terme de vitesse de vents. Ils ont détruit les stations sismologiques du Nord de l'arc et ont endommagé l'observatoire de Guadeloupe dont le toit s'est partiellement arraché. ■



Obs. volcanologique et sismologique de Guadeloupe (OVSG).
Volcanological and seismological obs. of Guadeloupe (OVSG). © IPGP



Obs. volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM).
Volcanological and seismological obs. of Martinique (OVSM). © IPGP



Obs. volcanologique du Piton de La Fournaise (OVPF).
Volcanological obs. of Piton de La Fournaise (OVPF). © IPGP



Nouvel OVSM en cours de construction.
New OVSM under construction. © IPGP

- The three observatories operate a core geophysical network of 86 seismic stations and 50 GNSS (Global Navigation Satellite System) stations, which transmit their data in real or near real-time. In 2016, a new quadrupole spectrometer was installed at OVSG to keep on analysing volcanic gases. In December of 2016, the OVSG began the installation of three automatic continuous multi-gas stations (CO_2 , H_2S , SO_2 , H_2O) at the summit of La Soufrière. In November 2016, the 8th RAP technical and scientific days were organized for the first time in Guadeloupe. The OVSG was partner and co-organizer of this conference.

- The observatories provide information bulletins on volcanic activity and seismicity to the population, authorities, and media (OVSG: monthly; OVPG: monthly and daily; OVSM: trimonthly). Last year, the OVSG and OVSM observatories identified 7038 seismic events and localized 4201 ones in the West Indies region, many of which are part of the aftershocks associated with the Mw 6.3 "Les Saintes" regional earthquake that occurred near Guadeloupe on 21 November 2004. 37 felt earthquake bulletins were sent to local authorities in Guadeloupe and Martinique. La Soufrière of Guadeloupe shows signs of degassing unrest and an increase in the thermal flux both in summit areas and fumaroles as well as in several hydrothermal springs. In the context of the 40 year anniversary of the 1976 Soufrière magmato-phreatic eruption, the observatory of Guadeloupe took part in many commemorations and public awareness activities to remind the population about the current behaviour of La Soufrière. In October 2016, IPGP organized a scientific prospective to discuss the current state of knowledge of La Soufrière. In March 2017, the Lesser Antilles observatories participated to the Richter and Caribe Wave exercises to stress their seismic and tsunami response plan regarding the large earthquake of 1843 in North Guadeloupe.

- In 2016, the observatory of Piton de la Fournaise dealt with two short eruptions located in the Enclos-Fouqué caldera, an uninhabited zone visited every year by 220,000 people. It has recorded 11375 seismic events, localized 2388 ones and sent 25 activity bulletins to the local authorities. In the continuity of the volcano unrest that start in June 2014, the observatory has been recording, via its geophysical and geochemical networks, a discontinuous deep magma refilling of its shallowest magma reservoir all along 2016. The observatory of La Réunion has an exchange program with its Hawaiian counterpart and a collaboration with the Earth Observatory of Singapore (EOS). Thus a seismologist and two engineers of the observatory went to Hawaii and Singapore in 2016 for collaborative research.

- The historical volcano observatory of la Martinique was built in 1936. As it does not respect para-seismic building code, the territorial council of Martinique (CTM) decided to rebuild a modern observatory 10 years ago; it will be delivered in 2018. Thus IPGP is taking this unique opportunity to pave the way for a new Caribbean research and monitoring platform in earth science by reinforcing collaboration with Caribbean partners (Cuba, Haiti, Trinidad) and in developing new marine instruments.

- Hurricane Irma and Maria: in September 2017, two category 5 hurricanes have crossed the Antilles arc for the first time since 1850. Irma is the strongest storm on record to exist in the open Atlantic region. They ruined field stations in the North of the arc and the observatory of Guadeloupe whose roof was partially torn. ■

Le Piton de la Fournaise, un volcan très actif

The Piton de la Fournaise, a very active volcano

L'activité de l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVVP) fut marquée en 2016-2017 par la gestion de quatre éruptions et une intrusion magmatique "avortée" (17 mai 2017), représentant un total de 81 jours d'éruption.

Les quatre éruptions se sont déroulées à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué, vaste dépression naturelle inhabitée mais visitée par plus de 120 000 personnes par an. Les fissures éruptives se sont ouvertes sur les flancs et à la base du cône terminal, au Nord : 11-18 septembre 2016 (5.9 Mm³), et au Sud : 26-27 mai 2016 (0.5 Mm³), 31 janvier - 27 février 2017 (6.3 Mm³), 13 juillet - 27 août 2017 (< 10 Mm³). Après deux éruptions de courte durée en 2016, l'année 2017 fut particulièrement active au Piton de la Fournaise, non pas en terme d'intensité (< 3 m³.s⁻¹) ou de volume émis, mais en termes de jours d'éruptions cumulés sur l'année (72).

Ces quatre éruptions ont suivi le même schéma éruptif, typique des éruptions effusives classiques du Piton de la Fournaise, à savoir :

1) l'ouverture de fissures éruptives d'où s'échappent des coulées de lave relativement fluides et des fontaines de lave d'une hauteur maximale de 50 m ;

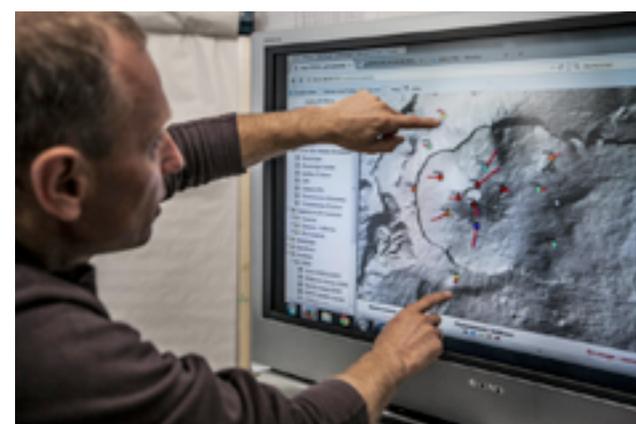


Éruption d'août 2015.
Eruption in August 2015. © OVVP IPGP

- 2) la focalisation de l'activité éruptive sur le point le plus en aval après plusieurs heures d'activité ;
- 3) la formation de nouveaux cônes éruptifs par accumulation des produits issus de l'activité des fontaines de lave ;
- 4) l'évolution vers une activité principalement en tunnels de lave pour les éruptions les plus longues.

Cette activité 2016-2017 s'est traduite pour l'OVVP en :

- 1494 heures d'astreintes renforcées (se rajoutant aux astreintes H24 classiques) ;
- 116 bulletins exceptionnels détaillés d'activité (se rajoutant aux bulletins quotidiens relatifs aux observations de la veille) ;
- 17 alertes en lien avec l'activité du volcan auprès de l'Etat Major de Zone et de Protection Civile de l'Océan Indien (augmentation de sismicité, crises sismiques, début trémor éruptif, fin trémor éruptif). ■



Être capable d'anticiper l'endroit où la lave va s'écouler ou bien savoir combien de temps va durer une éruption, tels sont les défis futurs de l'OVVP.

Being able to anticipate where the lava is going to flow, or knowing how long an eruption will last, are the future challenges for the OVVP.
© Thibaut VERGOZ / UMS-IPGP / CNRS Photothèque



Prélèvement d'échantillon de lave lors de l'éruption d'octobre 2005.
Sampling of lava during the October 2005 eruption. © OVVP IPGP

The activity of the Piton de la Fournaise Volcanological Observatory (OVVP) was marked in 2016-2017 by the management of four eruptions and an 'aborted' magma intrusion (17 May 2017), representing a total of 81 days of eruption.

The four eruptions took place inside the Enclos Fouqué caldera, a vast, uninhabited natural depression that is nevertheless visited by more than 120,000 people each year. The fissure eruptions opened up on the sides and at the base of the summit cone, to the North: 11-18 September 2016 (5.9 Mm³), and to the South: 26-27 May 2016 (0.5 Mm³), 31 January - 27 February 2017 (6.3 Mm³), 13 July - 27 August 2017 (< 10 Mm³). After two short eruptions in 2016, 2017 proved to be a particularly active year at the Piton de la Fournaise, not in terms of intensity (< 3 m³.s⁻¹) or in volume, but in terms of cumulative days of eruption over the year (72).

These four eruptions followed the same pattern, which is typical of the Piton de la Fournaise's classic effusive eruptions, i.e.:

- 1) fissure eruptions open, from which come relatively fluid lava flows and lava fountains reaching up to 50 m high;
- 2) eruptive activity focusses at the most downstream point after several hours of activity;
- 3) new eruptive cones are formed from the accumulation of the products resulting from the lava fountains;
- 4) the activity evolves primarily into lava tunnels for the longest eruptions.

For the OVVP, this activity in 2016-2017 meant:

- 1494 hours of additional on-call duty (on top of the usual 24-hour on-call);
- 116 special activity reports (in addition to the daily reports on the previous day's observations);
- 17 alerts related to the volcano's activity issued to the Regional and Civil Protection Headquarters for the Indian Ocean (increased seismic activity, seismic crises, start of eruption tremor, end of eruption tremor). ■



Grâce à la densité du réseau d'instruments et à l'analyse des données en temps réel, les volcanologues sont actuellement en mesure de déterminer où se produira l'intrusion du magma quelques dizaines de minutes avant le début de l'éruption. Éruption de février 2017.
Thanks to the density of the instrument network and real-time data analysis, volcanologists are now able to determine where the magma intrusion will occur a few tens of minutes before the eruption begins. Eruption in February 2017. © OVVP IPGP

Centre de données IPGP IPGP data center

Le centre de données de l'IPGP a pour mission principale la gestion et la mise à disposition des données géophysiques de l'IPGP à la communauté scientifique. Il est responsable de l'archivage de ces données, leur stockage à long terme (protection renforcée) ainsi que leur diffusion dans des formats et interfaces standards. Il est également en charge du transfert de ces données à des services externes tels que le Réseau sismologique et géodésique français (RESIF) ou l'International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN). Le centre de données développe et héberge des portails de données web à partir des observatoires de l'IPGP tels que GEOSCOPE et les observatoires volcanologiques et sismologiques (OVSG, OVSM et OVPF). De plus, le centre de données travaille depuis 2012 à la mise en œuvre de deux nouveaux services de données pour le sismomètre de la mission InSight (exploration interne de la planète Mars à partir de la sismicité, la géodésie et le transport de chaleur) : Mars SEIS Data Service et Mars SEIS Data Portal. ■

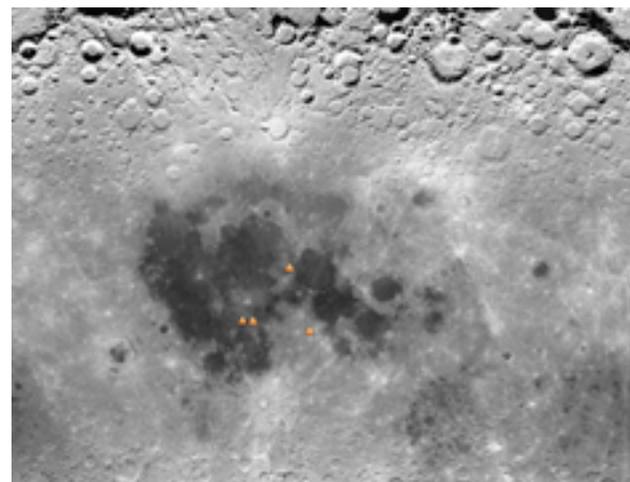


L'équipe du centre de données travaille en étroite collaboration avec les ingénieurs et techniciens des observatoires et du service informatique de l'IPGP.
The data center team works closely with engineers and technicians from the observatories and IT department of the IPGP. © AGU

The main mission of IPGP Data Center is to manage and to distribute geophysical data from IPGP to support the geophysical research community. IPGP Data center is responsible for data archiving, long-term curation (enhanced protection) and data distribution through standard formats and interfaces. IPGP Data Center is also in charge of relaying data to external services as the French seismological and geodetic network (RESIF) or the Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN). In addition, IPGP Data Center develops and hosts web data portals from the following IPGP observatories: GEOSCOPE, Volcanological and Seismological Observatories (OVSG, OVSM and OVPF). Moreover, IPGP Data Center has been working since 2012 to implement two new data services for the seismometer of the InSight Mission (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport): Mars SEIS Data Service and Mars SEIS Data Portal. ■



Portail Internet présentant les données géophysiques des observatoires volcanologiques et sismologiques aux Antilles.
Web portal presenting the geophysical data of volcanological and seismological observatories in the West Indies. © AGU



Réseau des stations sismologiques lunaires Apollo.
Network of Apollo lunar seismological stations.
© IPGP data center

Retour sur 2016-2017 / Back to 2016-2017

- À l'issue de ces deux années, le centre de données de l'IPGP gère les données (sismologiques et GNSS) de 5 réseaux permanents d'observatoires : G : GEOSCOPE ; GL : volcanologie et sismologie de la Guadeloupe ; MQ : volcanologie et sismologie de la Martinique ; PF : volcanologie de la Réunion (Piton de la Fournaise) ; WI : réseau sismologique français des Antilles (West Indies).

- En 2017, le système d'information a évolué afin de supporter les données volcanologiques (autres que la sismologie), comme par exemple l'inclinaison, le nivellement, la température, le magnétisme, la gravimétrie et la météorologie. Les données seront progressivement mises à la disposition des utilisateurs en 2018.

- L'infrastructure de gestion des données sismologiques pour la mission Mars InSight (instrument SEIS) est en phase de test ; les données seront disponibles à partir de 2019 via le service de données Mars SEIS, mis en œuvre et hébergé au centre de données de l'IPGP. Pour le projet SEIS InSight, une première version du SEIS Data Portal a été mise en ligne.

- Depuis 2016, les données de tous les réseaux sismologiques IPGP sont synchronisées avec RESIF et le centre de données FDSN (FDSN / IRIS-DMC) et sont disponibles via leurs portails de données et leurs interfaces, donnant une plus grande visibilité aux données IPGP.

- Le centre de données de l'IPGP peut désormais créer et gérer des données avec DOI (ex : hébergement de pages de destination). Au cours de l'année 2016, des DOI ont été créées pour le réseau sismologique GEOSCOPE (10.18715/GEOSCOPE.G) et celui des Antilles (10.18715/antilles.WI).

- Les ingénieurs du centre de données IPGP font partie du réseau technique RESIF. Dans ce cadre, ils ont continué à contribuer aux comités internationaux pour la

définition des standards sismologiques (ex : évolution du format MiniSEED). Ils ont également conçu et développé de nouvelles solutions partagées pour la gestion des données au niveau national et international. De plus, ils ont travaillé à la normalisation, au niveau national, de la nomenclature des métadonnées. ■

- By the end of 2017, IPGP Data Center manages data (seismological and GNSS) from five IPGP observatory permanent networks: G: GEOSCOPE, GL: Guadeloupe Seismic and Volcano, MQ: Martinique Seismic and Volcano, PF: Piton de la Fournaise Volcano, WI: West Indies French Seismic Network.

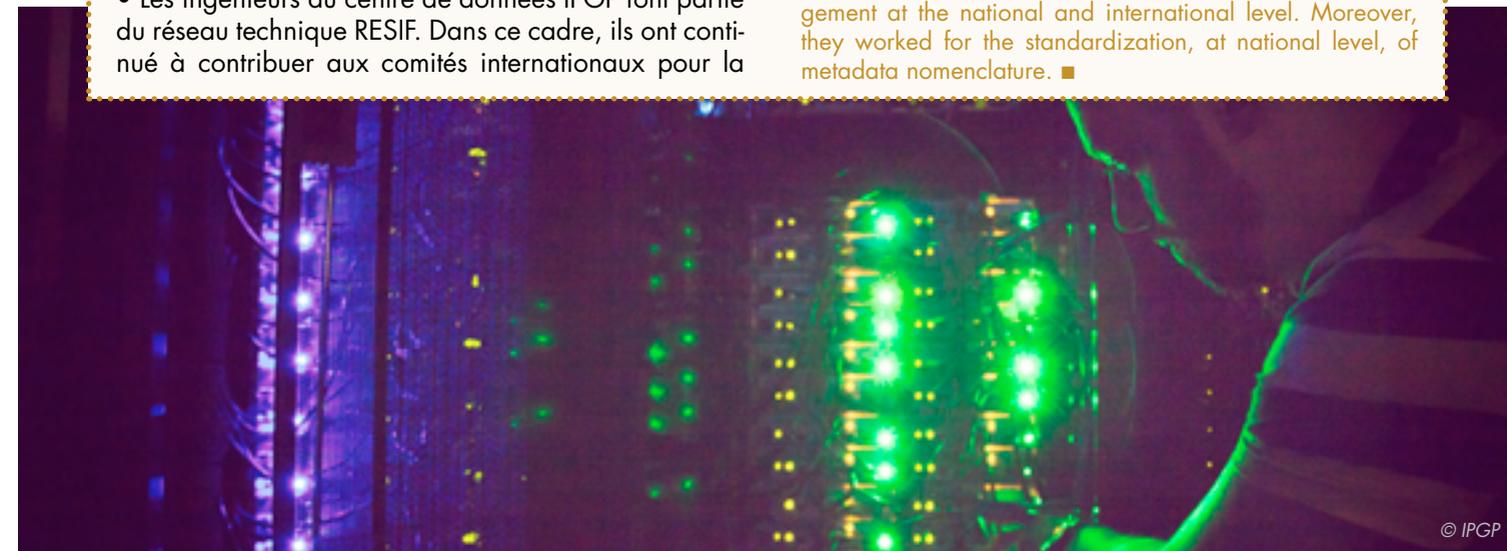
- On 2017, the information system evolved in order to support volcanological data (other than seismology) e.g., tilt, leveling, temperature, magnetism, gravimetry, weather. Data will be progressively available to users during 2018.

- The infrastructure for managing seismological data for the Mars InSight mission (SEIS instrument) is in its testing phase; data will be available starting from 2019 through the Mars SEIS Data Service, implemented and hosted at IPGP Data Center. For the SEIS InSight project, a first version of SEIS Data Portal has been released.

- Starting from 2016, the data of all the IPGP seismological networks is synchronized to RESIF and the FDSN Data Center (FDSN/IRIS-DMC) and is available through their data portals and interfaces, giving larger visibility to IPGP data.

- IPGP Data Center is now a service provider, within IPGP, for data DOI creation and management (e.g., hosting of landing pages). In 2016 DOIs have been created for the seismological networks of GEOSCOPE (10.18715/GEOSCOPE.G) and West Indies (10.18715/antilles.WI).

- Engineers of IPGP Data Center are part of the RESIF technical network. In this frame they continued to contribute to international committees for the definition of seismological standards (ex., evolution of the MiniSEED format). They also designed and develop new shared solutions for data management at the national and international level. Moreover, they worked for the standardization, at national level, of metadata nomenclature. ■



La sismicité aux Petites Antilles

The seismicity in the Lesser Antilles

En 2016 et 2017, l'observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe (OVSG) a détecté 4326 événements tectoniques et a pu en localiser et identifier 2151. De son côté, l'observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM) en a détecté 2204 et a pu en localiser 1922. 15 de ces événements tectoniques ont été ressentis à la Martinique, 43 à la Guadeloupe (dont 17 dans la région des Saintes et 15 dans les îles du Nord) et 6 suffisamment puissants pour être ressentis sur les deux îles. 4 d'entre eux ont libéré une énergie significative, atteignant une magnitude de 5.6 le 20 avril 2016 et le 17 avril 2017. L'évènement à l'Est de la Martinique de magnitude 5.8 enregistré le 3 février 2017 a généré les plus fortes intensités enregistrées à la Martinique de ces dernières années.

Le secteur des Saintes a une nouvelle fois été la zone la plus active de la région avec 2690 événements détectés (dont 627 localisés), incluant une séquence sismique fin avril 2017 d'un peu plus de 300 répliques par jour. L'activité sismique aux Saintes ne répond plus à la loi d'Omori qui définit la décroissance exponentielle du nombre de répliques suite à un séisme majeur. Cela soulève d'importantes questions scientifiques telles que les processus responsables de cette sismicité anormale (activation d'une autre faille à proximité ? Ascension de fluides magmatiques ou hydrothermaux ?).

Notons également qu'un évènement tectonique a été ressenti en Guyane française le 1^{er} juin 2017. Malgré une magnitude relativement faible de 3.8, ce séisme a provoqué énormément de réactions médiatiques compte tenu de la rareté des tremblements de terre dans cette région. En collaboration avec GEOSCOPE, l'OVSM a été en mesure de fournir des informations aux autorités, au grand public et à certaines parties prenantes (centre spatial de l'ESA à Kourou).

L'activité tectonique ressentie a conduit l'OVSM et l'OVSG à publier en 2016-2017 respectivement 27 bulletins d'alerte sismique pour le premier et 42 pour le deuxième. Pendant cette période de deux ans, environ 3500 rapports de témoins ayant ressenti un tremblement de terre ont été collectés par le BCSF, le Bureau central sismologique français, responsable de la compilation et de la localisation de l'activité sismique dans les territoires français.

En 2016 et 2017, l'activité sismique a reproduit le même schéma que les années précédentes, avec quelques séquences significatives du Sud au Nord :

- Est de l'île de Barbuda, dans la continuité des séismes de 2014 et 2015 ;
- Est de la Martinique, dans la zone de subduction ;
- Sismicité profonde au Nord de la Martinique, dans la zone du tremblement de terre de 2007 de magnitude 7.4 ;
- Sismicité crustale des Saintes, toujours importante suite au tremblement de terre de 2004 de magnitude 6.4 ;
- Nord-Est de la Guadeloupe ;
- La région de Barbuda, qui montre davantage d'activité ces dernières années. ■

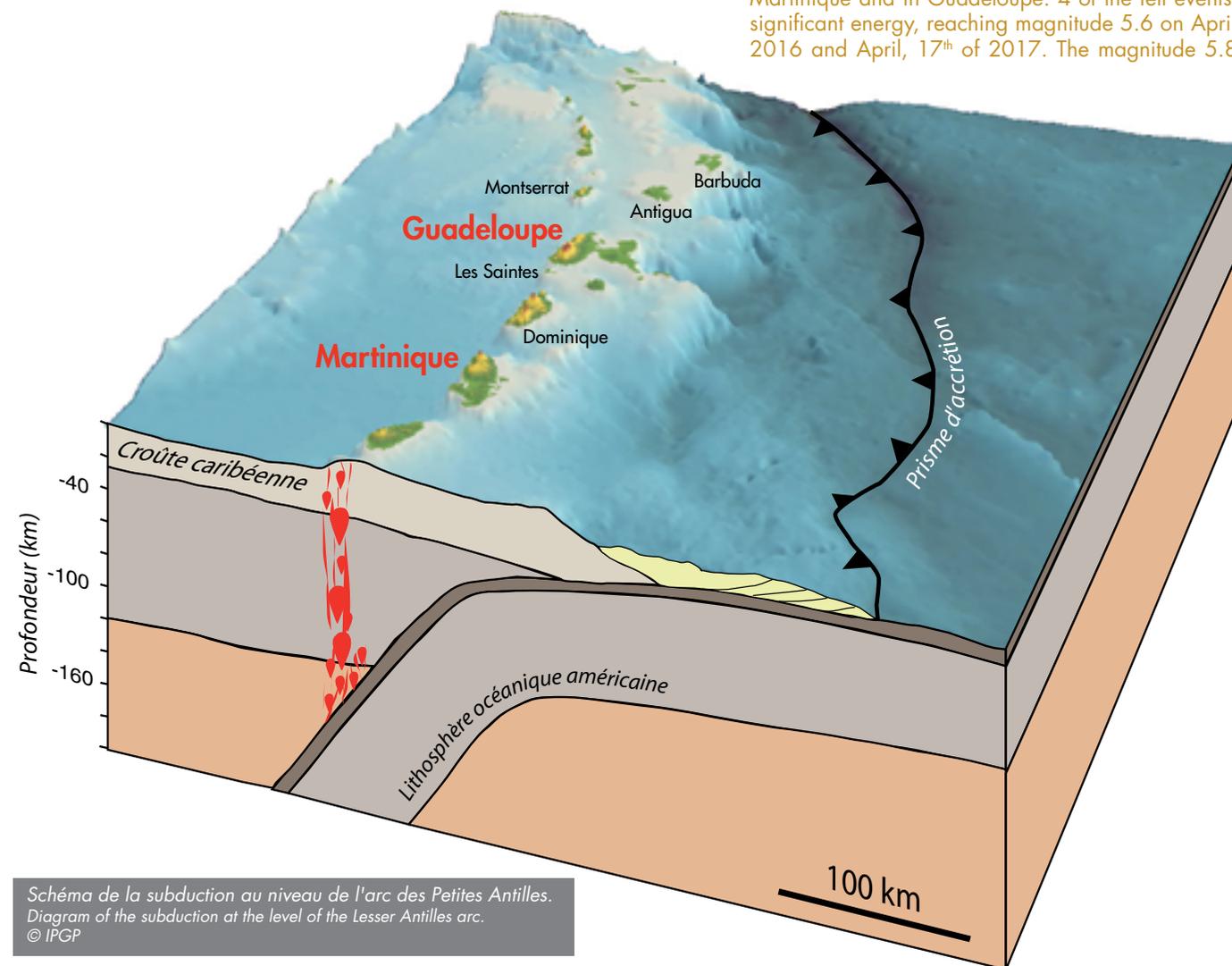


Schéma de la subduction au niveau de l'arc des Petites Antilles.
Diagram of the subduction at the level of the Lesser Antilles arc.
© IGP



Les plaques tectoniques à la surface du globe.
Tectonic plates on the Earth's surface. © IGP

In 2016 and 2017, the Guadeloupe Volcanological and Seismological Observatory (OVSG) detected 4326 tectonic events and was able to locate and characterize 2151 of them. The Martinique Volcanological and Seismological Observatory (OVSM) detected 2204 tectonic events and was able to locate and characterize 1922 of them. 15 of those events have been felt in Martinique, 43 in Guadeloupe (including 17 in Les Saintes region and 15 in the Northern Antilles islands) and 6 were strong enough to be felt both in Martinique and in Guadeloupe. 4 of the felt events were of significant energy, reaching magnitude 5.6 on April, 20th of 2016 and April, 17th of 2017. The magnitude 5.8 East of

Martinique event recorded on February, 3rd of 2017 generated the highest intensities recorded in Martinique over the last years. Finally, one event topped at a magnitude of 6.0 in March, 19th of 2016, at the East of Barbuda.

Les Saintes area has again been the most active zone of the region with 2690 events detected (627 of which were located) including a seismic swarm that occurred at the end of April 2017, with a maximum of more than 300 events per day. The seismicity rate for Les Saintes area does not fit anymore the Omori law that models an exponential decrease in seismicity following a mainshock. This raises some important scientific questions as to the processes currently responsible for this anomalous seismicity (activation of another nearby fault ? Ascent of crustal magmatic or hydrothermal fluids ?).

It should be noted that on June 1st of 2017, one event was felt in French Guyana. Despite a rather low magnitude of 3.8, it generated a lot of media activity given that seismicity is very rare in that region. In collaboration with GEOSCOPE, the Martinique observatory (OVSM) was able to provide some information to the authorities, the public, and some stakeholders (ESA's space center in Kourou).

The felt tectonic activity lead the Martinique observatory to issue 27 earthquake bulletins and Guadeloupe observatory to issue 42 earthquake bulletins during 2016-2017. During this two years period, around 3500 witness account reports of a felt earthquake were collected by BCSF, who is in charge of compiling and mapping the earthquake intensity for French territories.

In 2016 and 2017, the seismicity showed the same main activity pattern as in the previous years, with several noticeable swarms of activity, from South to North :

- East of Barbuda, following the 2014 and 2015 earthquakes;
- East of Martinique, on the subduction zone;
- Deep seismicity North of Martinique, in the area of the 2007 magnitude 7.4 earthquake;
- Les Saintes crustal seismicity, still abundant after the 2004 magnitude 6.4 main shock;
- North-East of Guadeloupe;
- Barbuda region, which shows more activity in the recent years. ■



Enseignement Teaching

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

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

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

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

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

- > Des cours assurés par des enseignants-chercheurs et chercheurs de renommée internationale de l'université Paris Diderot, de l'IPGP, de ses partenaires académiques (ENS, Mines ParisTech, IGN, IFSTTAR...) et du monde de l'entreprise.
- > Une solide formation de terrain (jusqu'à six semaines de terrain sur l'ensemble de la formation).
- > Des formations bénéficiant d'un plateau technique d'exception.
- > Entre 7 et 11 mois de stage professionnel.
- > L'adossement des formations aux équipes de recherche et aux observatoires de l'IPGP (160 chercheurs,

110 doctorants) offrant une remarquable diversité dans les activités de recherche en géosciences. > De nombreux partenariats avec de grands groupes industriels de l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles, de la gestion de l'environnement, des géomatériaux. ■

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

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

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

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

- > Classes taught by internationally-renowned researchers and instructors from Paris Diderot University, the IPGP, and its academic partners (ENS, MINES ParisTech, IGN, IFSTTAR, etc.), and from the corporate world.
- > Solid field training (up to six weeks of field work throughout the course).
- > Courses with access to exceptional technical resources.
- > 7 to 11 months of professional placement.
- > Courses backed by the IPGP's research teams and observatories (160 researchers, 110 PhD students), offering remarkable diversity in geoscience research activities.
- > Numerous partnerships with major industrial groups in exploration and exploitation of natural resources, environmental management, and geomaterials. ■



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

Le brassage culturel est un facteur essentiel de réussite des étudiants. Environ 20% des inscrits en master et 35% des doctorants viennent de pays étrangers, proportions appelées à augmenter de façon significative à l'avenir. Au fil des années, l'IPGP a développé des collaborations étroites avec des universités étrangères prestigieuses : université du Minnesota, université de Sao Paulo, university of Western Australia, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), université Ludwig-Maximilians... Leurs enseignants visitent l'institut et donnent des cours aux étudiants de deuxième et de troisième cycle.

Une politique d'équivalence de diplômes permet à de brillants étudiants étrangers de venir étudier à l'IPGP tout en validant leur diplôme dans leur pays d'origine. Un programme de double diplôme verra le jour courant 2018 avec l'Indian Institute of Education Science and Research de Pune, avec des bourses d'accueil à la clé pour les meilleurs étudiants. Sept étudiants ont pu bénéficier de cette bourse en 2017 (Algérie, Allemagne, Iran, Madagascar, Malaisie, Roumanie, USA).

En outre, la création de la spécialité "Géophysique d'exploration" (GPX) en 2012, entièrement enseignée en langue anglaise, adossée à une chaire industrielle de l'ANR cofinancée par un consortium industriel, permet d'accueillir chaque année une dizaine d'étudiants venus du monde entier.

La création d'un second parcours de M2 entièrement en anglais depuis la rentrée 2017, couvrant l'ensemble des champs disciplinaires de l'IPGP, vient renforcer l'attractivité de l'institut et des formations qu'il propose pour les étudiants non francophones.



Les collaborations avec l'Asie et le monde arabe ayant toujours irrigué la vie de l'institut, une double licence ASTER a été créée (Asie orientale, monde arabe et sciences de la Terre), en partenariat avec l'université Paris Diderot et l'Institut National des Langues et Civilisations Orientales (INALCO). Elle se propose de former des étudiants qui disposeront, à terme, d'un niveau de référence en sciences de la Terre et de l'environnement et qui seront capables de travailler ou de poursuivre des études de deuxième et troisième cycle en arabe, chinois ou japonais.

Enfin, l'IPGP a pu développer la mobilité étudiante grâce au soutien de la COMUE Université Sorbonne Paris Cité et à ses accords de collaboration. Chaque année, des étudiants de master peuvent réaliser s'ils le souhaitent des recherches dans des laboratoires étrangers. En 2017, quatre étudiants ont bénéficié de ce programme pour aller effectuer des stages en Europe et en Amérique du Nord. ■



Formation sur le terrain.
Field training. © IPGP

Cultural exchange is an essential factor in students' success. About 20% of students in master's programmes and 35% of doctoral students come from abroad, and these proportions are expected to substantially increase in the future.

Over the years, the IPGP has developed close collaborations with prestigious universities abroad: University of Minnesota, University of Sao Paulo, University of Western Australia, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), University Ludwig-Maximilians... Instructors from these universities visit the institute and teach classes for master's and doctoral students.

A policy of joint degrees makes it possible for bright international students to come study at the IPGP while completing credits towards their course in their home country. A Dual Degree Programme will be launched in 2018 with the Indian Institute of Education Science and Research in Pune, with study grants available for the best students. Seven students received these grants in 2017 (Algeria, Germany, Iran, Madagascar, Malaysia, Romania, USA).

Furthermore, the creation of the 'Exploration Geophysics' (GPX) specialisation, taught entirely in English and with an industrial chair from the ANR jointly funded by an industry consortium, makes it possible to host around ten students from around the world each year.

The creation of another second-year master's programme in English as of the start of the fall 2017 term, covering all of the IPGP's disciplines, further increases the attractiveness of the institute and its study programmes for non-French-speaking students.



Expérience de géochimie auprès d'élèves d'écoles primaires pour la Fête de la science.
Geochemistry experiment with primary school students for the Science Festival.
© IPGP



Visite de l'établissement par un doctorant de l'IPGP à l'occasion de la Fête de la science.
Visit of the institution by a IPGP PhD student for the Science Festival. © IPGP

As collaborations with Asia and the Arab world have always been the lifeblood of the institute, a dual undergraduate degree, ASTER, has been created in partnership with Paris Diderot University and the Institut National des Langues et Civilisations Orientales (INALCO). Its aim is to provide students with a reference level in Earth and environmental sciences so that they will be able to work or continue on to master's or doctoral studies in Arabic, Chinese or Japanese.

Lastly, the IPGP has been able to increase student mobility thanks to the support of the University Sorbonne Paris Cité COMUE and its collaboration agreements. Each year, master's students are able to conduct research in laboratories abroad. In 2017, this programme enabled four students to pursue research placements in Europe and North America. ■

Parcours Géophysique d'exploration (GPX)

Exploration geophysics course (GPX)

Le parcours Géophysique d'exploration (GPX) forme des géophysiciens de haut niveau, spécialistes des méthodes d'exploration géophysique pour l'exploitation des ressources naturelles (pétrole, gaz, minerais...). Créé en 2012, ce programme, enseigné entièrement en anglais, accueille chaque année entre 5 et 10 étudiants en provenance du monde entier ayant une solide expérience en physique et mathématiques. Il est soutenu par de nombreuses institutions nationales et internationales telles que MINES ParisTech, l'ANR, des partenaires industriels (Schlumberger, Total, CGG et Shell), l'université de Kyoto, l'Indian Institute of Technology Madras, le Norwegian Institute of Science and Technology ou encore l'Institut Teknologi Bandung en Indonésie.

Les quatre premiers mois du cursus sont consacrés à la géophysique quantitative, qui se focalisent sur la sismologie théorique, permettant d'acquérir un socle de connaissances solide pour le stage de recherche qui suit. Les étudiants reçoivent une bourse d'études au bout de dix mois. Plusieurs rapports de stage de terrain et de mémoires de master en recherche ont déjà été publiés dans des revues scientifiques. Environ 50% des étudiants diplômés en GPX ont poursuivi leurs recherches par une thèse à l'IPGP ou ailleurs à l'issue de leur master, le reste d'entre eux ayant obtenu un poste dans l'industrie.

L'année 2018-2019 devrait voir un nombre croissant d'étudiants internationaux recrutés à l'IPGP dans tous les domaines des sciences de la Terre solide. ■



The Exploration geophysics (GPX) course of study trains high-level geophysicists specialised in geophysical exploration methods for the exploitation of natural resources (petroleum, gas, minerals, etc.) Created in 2012, this course, which is taught entirely in English, each year hosts between 5 and 10 students from around the world with strong experience in physics and mathematics. It is supported by many French and international institutions such as MINES ParisTech, the ANR, industrial partners (Schlumberger, Total, CGG and Shell), the Kyoto University, the Indian Institute of Technology Madras, the Norwegian Institute of Science and Technology and the Bandung Institute of Technology in Indonesia.

The first four months of the course are dedicated to quantitative geophysics, focussed on theoretical seismology, enabling students to acquire a solid knowledge base for the research placement that follows. The students receive a study grant after ten months. Several field internship reports and master's research dissertations have already been published in scientific journals. Around 50% of students having earned the GPX degree have gone on to continue their research with a thesis at the IPGP or elsewhere after finishing the master's course. The rest have obtained positions in industry.

The 2018-2019 year is expected to see an increasing number of international students being recruited at the IPGP in all fields of solid Earth sciences. ■



Parcours Génie de l'environnement et industrie (GEI)

Environmental engineering and industry course (GEI)



La performance des entreprises ne dépend plus seulement de leur compétitivité mais aussi de leur capacité à prendre en compte les contraintes environnementales, à anticiper leurs impacts et à s'y adapter. De nouveaux métiers émergent, liés à la mise en place de stratégies nationales de transition écologique, à l'économie d'énergie et à la recherche d'énergies de substitution. Partant de ce constat, le master Génie de l'environnement et industrie (GEI), dispensé en alternance, développe et entretient des relations étroites avec le monde de l'entreprise et de l'industrie, permettant d'offrir aux étudiants des méthodes et un savoir-faire professionnels, en leur assurant une large gamme de débouchés dans les métiers de l'environnement au niveau cadre.

À l'issue de la formation, l'insertion professionnelle avoisine les 100%. Les métiers sont évolutifs et variés, au sein de PME/PMI, de grands groupes industriels, de sociétés et bureaux d'étude ou encore de collectivités territoriales. Quelques exemples de métiers visés : diagnostic de nuisances et étude d'impacts, étude et conception de procédés propres, développement durable, démarche Agenda 21, gestion intégrée QHSE, audits environnementaux, démarches HQE, BREEAM et LED, mise en place des normes ISO 14001, 50001, OHSAS 18001, sécurité et risques industriels, dépollution et réhabilitation de sites, R&D des procédés de traitement des pollutions, efficacité énergétique, audit énergétique, ACV (analyse cycle de vie), écoconception, économie circulaire, Bilan Carbone...

Le master GEI a obtenu de nombreuses distinctions et apparaît notamment dans le classement Eduniversal Master ranking 2017 / TOP 20 ainsi que dans celui de l'Etudiant 2015 et 2016. ■

Companies' success no longer depends solely on their competitiveness, but now also on their ability to take environmental constraints into account, anticipate their impacts and adapt to them. New professions are emerging in relation to the implementation of national strategies for ecological transition, energy savings and alternative energies. With this in mind, the Environmental engineering and industry (GEI) master's course, which includes an apprenticeship, develops and maintains close relationships with the corporate and industrial world, making it possible to provide students with professional methods and knowledge, and offering them a wide variety of career prospects at management level in the environmental professions.

The employment level after completion of the course is nearly 100%. The professions are changing and varied, within small and medium-sized businesses, major industrial groups, consulting firms and local authorities. Some examples of targeted professions include: hazard diagnostics and impact studies, study and design of clean processes, sustainable development, Agenda 21 plan, integrated QHSE management, environmental audits, HQE processes, BREEAM and LED, implementation of ISO standards 14001 and 50001, OHSAS 18001, industrial risks and safety, depollution and site rehabilitation, R&D for pollution processing methods, energy efficiency, energy audit, LCA, ecodesign, circular economy, carbon accounting, etc.

The GEI master's course has received numerous distinctions, including appearing in the Eduniversal Masters Ranking 2017 / TOP 20, as well as in the 2015 and 2016 L'Etudiant rankings. ■

Études doctorales Doctoral studies

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



© IPGP

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



© IPGP



Congrès des doctorants PhD student conference

Conférence du médecin et explorateur français Jean-Louis Etienne, premier homme à avoir atteint le pôle Nord en solitaire, lors du congrès des doctorants 2017.
Conference by French doctor and explorer Jean-Louis Etienne, first man to reach the North Pole solo, at the PhD students conference 2017. © IPGP

Depuis plus de 20 ans, l'école doctorale des sciences de la Terre tient un congrès des doctorants, rassemblant des étudiants de l'institut de physique du globe de Paris, de l'université Paris Diderot, de l'École Normale Supérieure, ainsi que des étudiants en géosciences d'autres universités européennes. Chaque année, les doctorants de première année organisent et orchestrent cet événement, une conférence par les étudiants pour les étudiants.

Moment d'échange et de partage de la recherche à travers un large éventail de disciplines en géosciences, le congrès des doctorants illustre la variété et l'interdisciplinarité permettant de comprendre l'univers qui nous entoure. Un des objectifs clés du congrès est d'établir des liens entre les étudiants, avec des chercheurs, ainsi qu'avec des professionnels de l'industrie.

Ainsi, les étudiants montrent leurs travaux à travers des présentations, des sessions posters ou encore des soirées organisées pendant la semaine, débattent des travaux de leurs pairs et nouent des relations déterminantes avec des professionnels de tous horizons. À la fin de la semaine, le congrès est clôturé par une série de présentations d'éminents chercheurs en géosciences, puis par une soirée où l'ensemble des participants sont invités à venir échanger entre eux. ■

For over two decades, the Earth Science Doctoral School has held a PhD Student Conference (PhDSC), congregating students from the institut de physique du globe de Paris (IPGP), the Université Paris Diderot (UPD), and the École Normale Supérieure (ENS), as well as invited geoscience students from other European universities. Each year, 1st year PhD students

from these institutions organise and orchestrate this conference – a conference by students, for students.

The conference provides a platform for sharing research across a broad range of geoscience disciplines, illustrating how various geo-disciplines interconnect and work in unison to describe the universe around us. Moreover, a key initiative of the conference is to bring together and connect fellow PhD students not only with each other, but also with premier researchers and industry professionals.

Through presentations, poster sessions and networking events students present and discuss their own work, engage in discussions on the work of their peers, as well as create vital connections with professionals both inside and outside academia. As the week closes, the conference will be capped by a series of presentations from leading researchers in geosciences, as well as a conference reception where all attendees are invited to enjoy conversation with each other. ■



© IPGP



© IPGP

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

L'institut de physique du globe de Paris compte environ 110 doctorants, dont près de la moitié en provenance de pays étrangers et près d'un tiers venant de pays situés hors Union Européenne. Le service des études doctorales assure les démarches administratives liées à l'obtention des visas et des permis de séjour. En outre, il apporte son soutien chaque année à l'organisation du congrès des doctorants, permettant aux étudiants de la composante Terre-Environnement de l'ED STEP'UP de présenter l'avancée de leurs recherches et d'échanger avec des collègues de tous horizons ainsi qu'avec les chercheurs de l'IPGP et de l'ENS. Indépendamment, le SED propose aussi, sous forme d'appel à projets, une aide à la mobilité internationale en garantissant un soutien financier pour le développement de nouvelles collaborations avec des équipes de recherche du monde entier. Plus d'une quinzaine de doctorants en sont lauréats tous les ans, leur permettant de développer leur réseau professionnel en dehors des circuits traditionnels. Le SED soutient également l'association des doctorants HEKLA ainsi que le réseau d' alumni de l'IPGP (anciens diplômés). ■

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

The IPGP and its research department has a permanent population of about 90 PhD students, of which almost half are foreigners and nearly a third come from countries outside the European Union. As soon as STEP'UP has selected the future PhD students, the Doctoral Studies Department ensures the administrative procedures related to obtaining visas and residence permits. Every year, the Doctoral Studies Department supports the organization of the PhD Students' Congress, which enables PhD students from the Earth-Environment component of STEP'UP to present the evolution of their research and interact with European colleagues and all IPGP and ENS researchers. Independently, the Doctoral Studies Department also offers, in the form of a call for projects, International Mobility Grants to provide financial support for the development of new collaborations with research teams around the world. More than 15 PhD students are awarded every year and can thus develop their own scientific networks outside the traditional channels of publications and international congresses. The Doctoral Studies Department also supports the HEKLA PhD students' association and the Alumni network, which includes all former IPGP post-graduates. ■



© IPGP

Association étudiante Hekla

Hekla student association

L'Hekla est l'association des étudiants de l'école doctorale STEP'UP de l'IPGP, de l'université Paris Diderot, de l'UPMC et de l'ENS. Son bureau est composé de doctorants de première année et est renouvelé tous les ans. Son objectif principal est de favoriser les échanges entre les doctorants, les étudiants en master et l'ensemble des personnels. Des événements festifs et culturels sont régulièrement organisés, tels que des projections de films scientifiques, suivies de débats avec un chercheur sur le domaine du film. Citons également un concours de photographie en 2015 sur les chercheurs et personnels de l'IPGP dans leur environnement de travail, des olympiades sportives en 2016 ou encore un concours de cuisine du monde en 2017. L'association a notamment pour but d'intégrer les étudiants étrangers qui viennent d'arriver à Paris.

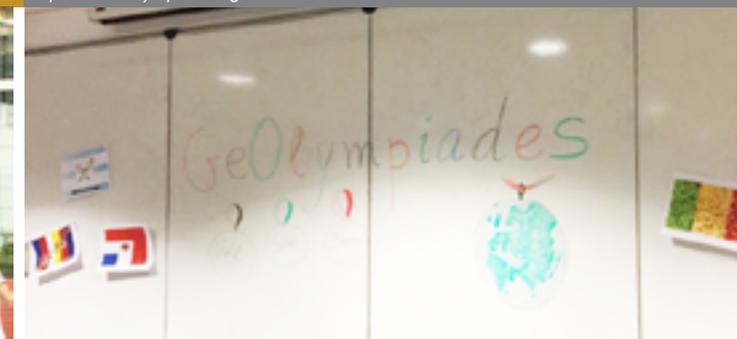


Chaque année l'Hekla participe de manière décisive au congrès des doctorants organisé par les doctorants de première année de l'école doctorale à l'IPGP. En outre, l'association aide à la gestion des financements du congrès ainsi que ceux du Festival des idées organisé par l'Université Sorbonne Paris Cité. ■

Hekla is the students' association for the STEP'UP doctoral school of the IPGP, Paris Diderot University, the UPMC and the ENS. Its leadership is made up of first-year doctoral students and is renewed every year. Its main goal is to facilitate exchanges between doctoral students, master's students, and faculty and staff. Festive and cultural events are organised regularly, such as screenings of scientific films followed by debates with a researcher on the topic addressed by the film. Other examples include a photography competition held in 2015 focussing on IPGP researchers and staff in their work environment, sports competitions in 2016 and a world cuisine cooking contest in 2017. One of the association's particular objectives is to help newly-arrived foreign students with their integration in Paris.

Every year, Hekla is decisively involved in the doctoral students' conference, which is organised by the first-year students from the IPGP's doctoral school. The association also helps manage the financing of the conference and of the Festival of Ideas that is organised by the University Sorbonne Paris Cité. ■

"Géolympiades" sportives organisées en 2016.
Sports "Geolympics" organised in 2016. © Hekla - IPGP





Kevin Juhel, doctorant en sismologie

Kevin Juhel, seismology PhD student

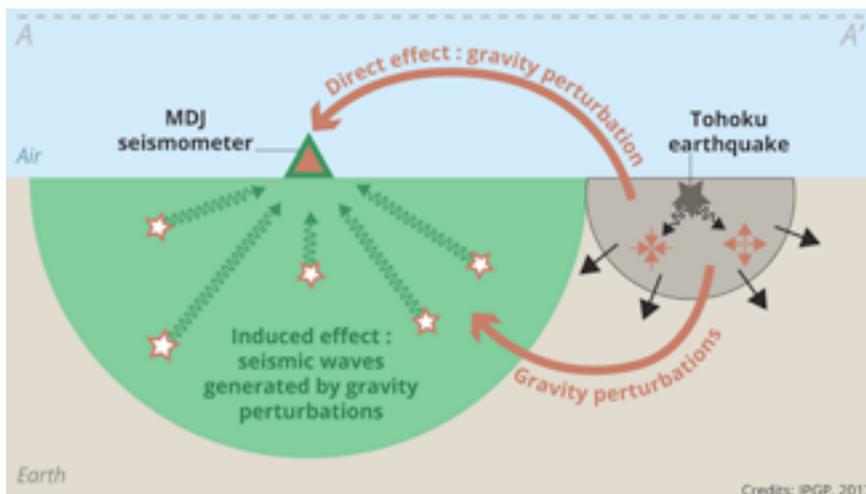
Lors d'un tremblement de terre, la rupture sismique et la propagation d'ondes qui en résultent entraînent une redistribution transitoire de masses à l'intérieur de la Terre. Celle-ci conduit à un rééquilibrage global et instantané du champ de gravité terrestre, en théorie mesurable avant l'arrivée du front d'ondes sismiques. L'objectif de cette thèse est de caractériser et de détecter une telle perturbation et d'en déduire rapidement des informations sur la rupture sismique.

Un instrument déployé au sol enregistre la perturbation du champ de gravité, ainsi qu'une accélération du sol induite par gravité : nous appelons le signal total résultant "perturbation élasto-gravitationnelle" (voir visuel). Le tremblement de terre de Tohoku-oki (magnitude 9.1, mars 2011, Japon) a développé l'une des ruptures les plus importantes de ces dernières décennies, à proximité de réseaux intégrant une instrumentation de pointe. Des perturbations élasto-gravitationnelles induites par cette rupture ont été détectées par des sismomètres large-bande à des distances comprises entre 1000 et 2000 km de la zone de rupture et modélisées avec précision à l'aide de la méthode dite des modes propres.

Aujourd'hui, un système de détection précoce de tremblements de terre permet de repérer l'occurrence d'un séisme avant l'arrivée des ondes sismiques destructrices générées par la rupture, afin d'en limiter les dégâts humains et matériels. Les systèmes d'alerte actuels reposent sur la différence de temps de propagation entre les ondes de compression P (peu destructrices) et les ondes de cisaillement S (plus lentes, mais dangereuses). Associé au développement de capteurs du gradient du champ de gravité à haute précision, nous introduisons un système de détection précoce reposant sur la gravité, qui pourrait permettre la réduction du temps d'émission de l'alerte et l'estimation rapide de la magnitude d'un tremblement de terre. ■

During a seismic event, the rupture and the propagation of seismic waves redistribute masses within the Earth. This mass redistribution generates in turn a dynamic long-range perturbation of the Earth gravity field, which can be recorded before the arrival of the direct seismic waves. During this PhD, we wanted to describe and detect such perturbations, and deduce information about the ongoing rupture.

A ground-based seismometer records a gravity-induced ground motion in addition to the gravity perturbation: we refer to the overall signal as elasto-gravitational perturbation (see figure). Transient perturbations are observed before the arrival of the direct seismic waves following the Tohoku-oki event (magnitude 9.1, march 2011, Japan), using data recorded by high-quality broadband seismometers located 1000 to 2000 km from the epicenter, and accurately modeled through normal modes summation.



Earthquake early warning (EEW) systems are automatic devices able to detect the occurrence of an earthquake before the arrival of ground-shaking waves, and to provide warning. Conventional EEW systems rely on the velocity difference between the fast seismic P-waves and the devastating S-waves. Associated with the current development of high-precision gravity strainmeters, we introduce a gravity-based EEW system which could increase warning times and provide an early estimate of the earthquake magnitude. ■



Sandrine Péron, doctorante en cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale

Sandrine Péron, cosmochemistry, astrophysics and geophysical experimentation PhD student



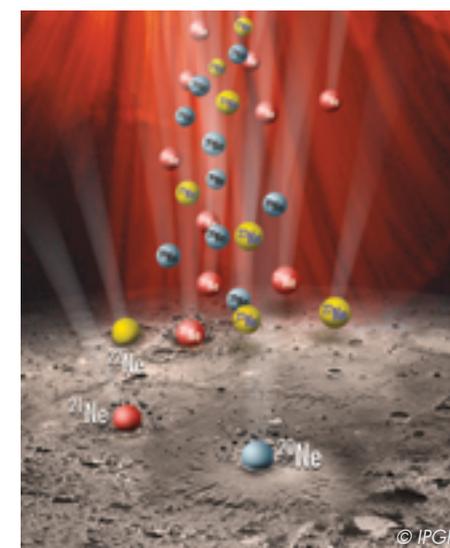
Lauréate du prix L'Oréal - UNESCO "Pour les Femmes et la Science" 2017
Winner of the 2017 L'Oréal - UNESCO "For Women in Science" Prize

Certains processus clés de la formation du système solaire et des planètes ne sont pas encore compris. Parmi eux, l'origine des éléments volatils sur Terre et les autres planètes telluriques (Mars, Vénus, Mercure), c'est-à-dire les éléments qui se condensent à très basse température tels que l'eau, l'azote et le carbone, reste problématique. Il s'agit pourtant d'éléments nécessaires à la vie. Comprendre leur origine, c'est aussi mieux appréhender les mécanismes de formation du système solaire. Plusieurs sources sont ainsi envisagées : les météorites, le vent solaire ou encore les comètes. Pour trancher entre ces différentes hypothèses, on peut utiliser les gaz rares (hélium, néon, argon, krypton et xénon), eux aussi volatils et qui de par leur caractère inerte se révèlent être des traceurs uniques de ces sources.

L'objectif de cette thèse est de mettre au point de nouvelles techniques d'analyse de ces gaz rares afin de connaître précisément la composition de la Terre en gaz rares et de la comparer à celles des autres objets du système solaire, dans le but de déterminer l'origine des éléments volatils. Les rapports isotopiques du néon et de l'argon ont notamment été déterminés avec précision par ablation laser sur des échantillons provenant du point chaud des Galápagos. Les résultats montrent que l'implantation du vent solaire sur les grains précurseurs de la Terre est probablement à l'origine d'une grande partie des éléments volatils légers du manteau terrestre (hélium, néon et probablement aussi de l'eau). ■

Key processes of solar system formation are still unresolved. In particular, the origin of volatile elements on Earth and other terrestrial planets (Mars, Venus, Mercury), elements that have low condensation temperatures, such as water, nitrogen, carbon, remains a big issue. These elements are yet crucial for life. Resolving their origin can also allow better understanding of solar system formation. Several sources could have contributed to the Earth's volatile budget: meteorites, solar wind or comets. To decipher between these different scenarios, noble gases (helium, neon, argon, krypton and xenon) are valuable tools because they are also volatiles and chemically inert, which makes them unique tracers of volatile sources.

This PhD project aims at developing new analytical techniques for measuring noble gases to determine precisely the Earth's noble gas composition so that the Earth can be compared with other solar system objects, in order to discriminate between the different scenarios of the origin of volatile elements. In the first part of the project, the neon and argon isotopic ratios were precisely measured with laser ablation on glass samples from the Galápagos hotspot. The results suggest that solar wind implantation on the Earth's grain precursors could explain the origin of light volatile elements (He, Ne and likely also H) in the Earth's mantle. ■



Relations internationales & partenariats

International relationships & partnerships

Un institut de recherche ouvert sur le monde A research institute open to the world

L'IPGP a développé au fil des années des relations privilégiées avec de nombreux partenaires académiques de haut niveau dans le monde entier à travers des projets de recherche et des actions de collaboration. Ces accords sont indispensables pour développer des réseaux fiables et pérennes, tels que ceux pour l'observation de la sismicité ou du champ magnétique mondial. Ainsi, le bureau des relations internationales de l'IPGP organise des workshops dans le cadre de "memorandum of understanding" ou accords de collaboration (ex : ERI, University of Tokyo ; LANL, USA ; Caltech-JPL, USA ; Novosibirsk State University, Russia ; National University of Seoul, S. Korea ; UC London, U.K...).



L'IPGP est membre de l'alliance européenne pour les sciences de la Terre Geo.8 avec le Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences, le British Geological Survey, l'Instituto de Ciencias de la Tierra Jaime Almera (ICTJA), le Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zuerich), l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), l'Utrecht University (UU) et le partenaire polonais qui regroupe cinq institutions de Varsovie.

Un programme d'invitation de professeurs et chercheurs étrangers participe au développement des projets de recherche. Plus de 40 d'entre eux ont, par exemple, été invités à l'IPGP sur l'année 2016-2017 pour des périodes de minimum un mois. Pour la période 2011-2016, environ 2/3 des invités ont tenu des séminaires, 170 articles scientifiques conjoints ont été publiés, 30 thèses co-encadrées, 79 projets scientifiques soumis (ANR, INSU, H2020) avec un taux de succès de plus de 40%. ■

Over the years, the IPGP has developed special relationships with numerous high-level academic partners around the world through research projects and collaborative efforts. These agreements are essential for the development of reliable and lasting networks, such as those global networks for the observation of seismic activity or the magnetic field. The IPGP's international relations office thus organises workshops in the context of Memorandums of Understanding or collaboration agreements (ERI, University of Tokyo; LANL, USA; Caltech-JPL, USA; Novosibirsk State University, Russia; National University of Seoul, S. Korea; UC London, UK...)

The IPGP belongs to the Geo.8 European Network for Earth Sciences with the Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences, the British Geological Survey, the Instituto de Ciencias de la Tierra Jaime Almera (ICTJA), the Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zuerich), the Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Utrecht University (UU) and the Polish partner that groups together five Warsaw institutions.

A programme for hosting foreign professors and researchers contributes to the development of research projects. For example, more than 40 were invited to the IPGP in the 2016-2017 year for periods of at least one month. From 2011 to 2016, about two-thirds of the visitors hosted seminars, 170 joint scientific articles were published, 30 theses were co-directed and 79 scientific projects were submitted (ANR, INSU, H2020) with a success rate of over 40%. ■



Des partenariats efficaces et durables Efficient and sustainable partnerships

En 2016, 11 contrats de partenariat ont été signés avec des groupes industriels, allant d'entreprises du CAC 40 ou cotées à la bourse de Londres (SHELL, TOTAL, Petrobras, Lafarge Holcim, AREVA et Saint-Gobain) à de très petites entreprises comme Nanobactérie ou Coronis (dérivée de l'université de Gérone en Espagne). Ces partenariats représentent une implication d'environ 12% des responsables scientifiques de l'IPGP pour un budget annuel de 800 K€, équivalant à 10% du budget total des contrats de recherche (salaires non inclus).

Les sujets de recherche développés par le biais de ces partenariats couvrent un large spectre de l'expertise scientifique de l'IPGP allant de la géophysique et la géochimie aux sciences de l'environnement et des matériaux. Ces projets sont des moyens efficaces pour former de jeunes étudiants à des carrières académiques ou industrielles. 7 projets doctoraux en cours sont en collaboration avec des partenaires industriels : 4 dans le secteur pétrolier et 3 en sciences de l'environnement et des matériaux. Par ailleurs, 9 doctorants travaillent en collaboration avec les plus importants EPICs français (Établissements publics à caractère industriel et commercial) : CEA, CNES, IFPEN, IRSN, ONERA et BRGM.

Voici une synthèse des principaux résultats obtenus dans le cadre des quatre problématiques abordées :

1. Comment utiliser les processus actuels de la Terre pour comprendre la formation du pétrole

Le nouvel objectif dans l'exploration du pétrole pourrait être les réservoirs de roche lacustres. L'industrie pétrolière a ainsi besoin de nouveaux outils géochimiques pour orienter la prospection de ces nouvelles ressources (C, N, signatures isotopiques des cœurs de formation potentielle de pétrole). Le projet développé en partenariat avec TOTAL se sert des connaissances que les équipes de l'IPGP acquièrent sur des environnements actuels naturels lacustres pour comprendre la formation de ces nouveaux types de réservoirs et calibrer les traceurs géochimiques pertinents pour l'optimisation des stratégies de prospection industrielle.

Un autre projet, en collaboration avec ces mêmes partenaires, utilisera les marqueurs géologiques et géochimiques ainsi que les flux de chaleur issus des forages pétroliers pour comprendre les activités passées des points chauds et relier ces derniers à la tectonique et aux ressources. Les résultats principaux de ce projet obtenus en 2016 suggèrent fortement que le point chaud Est-africain ait affaibli la lithosphère suffisam-

ment longtemps pour localiser la déformation le long de sa trajectoire.

In 2016, 11 contracts were running in partnership with industries, ranging from London Stock exchange, CAC 40 companies (SHELL, TOTAL, Petrobras, Lafarge Holcim, AREVA or Saint-Gobain) to very small companies such as Nanobactérie or Coronis (a spinoff from the University of Girona). The man month implication for IPGP PIs corresponds to 216 man months in other words 12% of the IPGP PIs for an annual budget of 800 K€ representing 10% of the total budget of research contracts (not including PI and Staff salaries).

The research topics developed in partnership cover various aspects of the scientific expertise of the IPGP teams from geophysics, geochemistry to material and environmental sciences. These projects are efficient tools to train young students for academic and industrial careers. 7 PhD projects are running by co-funding with the industrial partners: 4 in the oil sector, 3 in material and environmental sciences. In addition 9 PhDs are advised in collaboration with the major French EPICs (i.e. public institutions with industrial and commercial activity) namely the: CEA, CNES, IFPEN, IRSN, ONERA and BRGM.



ment longtemps pour localiser la déformation le long de sa trajectoire.

2. De nouveaux outils géophysiques pour l'industrie pétrolière

Le deuxième volet de notre partenariat avec le monde industriel est le développement de techniques géophysiques de pointe et d'outils liés à la prospection du pétrole. Une percée majeure a été faite dans le domaine de la vision sous-marine par ordinateur pour les observations géologiques. En collaboration avec Coronis Computing (Espagne), de nouvelles techniques d'imagerie sous-marine ont été développées pour l'exploration du plancher océanique, incluant une reconstruction 3D du terrain issue d'une structure d'images obtenue grâce à une mosaïque de photos et vidéos en mouvement et une calibration d'images.

Les conditions proches de la surface fortement changeantes et la complexité de la géologie peu profonde entraînent des variations rapides de vitesse sismique et des attributs liés, qui peuvent être difficiles à modéliser en utilisant des techniques conventionnelles. La complexité non résolue de ces couches superficielles entraîne incertitude et inexactitude dans les couches plus profondes, là où l'hydrocarbure recherché est souvent localisé. FWI est un outil polyvalent qui convient à ce type de défis en fournissant des images souterraines plus nettes, facilitant ainsi leur interprétation et leur compréhension. En collaboration avec Shell, une inversion des formes d'ondes sismiques par approximation élastique 2D anisotrope a été obtenue.

3. De nouveaux procédés et matériaux pour une industrie du bâtiment durable

Le groupe Lafarge Holcim a développé un nouveau mâchefer émettant moins de CO₂ au cours de sa pro-

Here we give a resume of the major results obtained for the four items addressed:

1. How can we use present day earth processes to understand the parent rock oil formation

The new target for oil exploration could be lacustrine rock reservoirs. The oil industry therefore needs new geochemical tools to guide the prospection for these new resources (i.e. C, N, isotopic signatures in cores of potential oil formations). The project developed in partnership with TOTAL uses the knowledge that IPGP teams will acquire on actual natural lacustrine environments to understand the formation of those new types of reservoirs and calibrate the relevant biogeochemical tracers to optimize the prospection strategies of the industrial partner.

Another project with the same industrial partners will use geological, geochemical markers and heat flux from oil drilling to understand past hot spot activities and to link them to tectonic and resources. The principal results of this project obtained in 2016 strongly suggest that the East Africa Hot spot weakened the lithosphere long enough to localize deformation along its trajectory.

2. New geophysical tools for the oil industry

The second aspect of our partnership with the industry is the development of advance geophysical techniques and tools related to oil prospection. A major breakthrough was obtained in the field of underwater computer vision for geological observation. In collaboration with Coronis Computing (Spain) new underwater imaging techniques were obtained for seafloor exploration that include a 3D terrain reconstruction from structure obtained from motion photo and video mosaicking and image calibration.

Highly variable near-surface conditions and complex shallow geology, cause rapid variation in seismic velocities and related attributes, which can be difficult to model using conventional techniques. Unresolved complexity in the shallow causes uncertainty and inaccuracy deeper down, where hydrocarbon targets are often located. FWI is a versatile tool

duction : Aether®. Il est très prometteur mais sa teneur en bore dans les composants lisses majeurs a grandement changé la propriété et la structure de ces derniers. L'ajout de B₂O₃ en petites quantités intègre le réseau en tant que BO₃ et décompose le réseau d'aluminate composé de tétraèdre AlO₄- qui entraîne une forte dépolymérisation. Alors que de plus grands ajouts de bore entraînent l'apparition de BO₄ qui renforce ce réseau d'aluminate et réduit la polymérisation.

Ces premiers résultats importants sont encourageants pour la compréhension fondamentale du rôle des éléments constitutifs du mâchefer, mais aussi dans une perspective environnementale en nous permettant de mieux comprendre le mécanisme de formation d'un mâchefer "vert". Les questions clés sur la structure et les propriétés des verres intègrent une des questions les plus anciennes sur le rôle des éléments qui les constituent. Certains éléments, comme Ge et B, sont des éléments formateurs du réseau, tandis que l'alcalin et la terre alcaline sont tous deux "modificateur de réseau = interrupteurs de réseau" ou compensateurs de déficits de charge de réseau. Ces concepts sont enseignés mais n'avaient encore jamais été mis en évidence. En utilisant Ca et la spectrométrie d'absorption des rayons X K, il a été possible de prouver ces concepts et d'avoir par conséquent une meilleure compréhension des processus d'oxydoréduction et de nucléation dans les verres.

4. Géosciences et prospection de minerai

L'utilisation de matériaux issus de ressources naturelles dans les processus de production et de consommation entraîne de nombreuses conséquences environnementales et économiques, comprenant le niveau d'extraction et d'épuisement des stocks de ces ressources, renouvelables ou non, les pressions environnementales associées à cette extraction, leur traitement, leur transport et leur utilisation. De nouveaux outils sont nécessaires pour une meilleure prospection, plus sûre et plus

suited to these challenges and provides clearer subsurface images, thus facilitating better interpretation and understanding. In collaboration with Shell company a 2D elastic anisotropic full waveform inversion for land seismic data was obtained.

3. New processes and materials for a sustainable building industry

The Lafarge Holcim Group has developed a new clinker with low CO₂ emission during its production: Aether®. This new clinker is very promising, but it contains boron and the incorporation of boron in the major glassy components of the clinker greatly changed their property and structure. The addition of B₂O₃ in small quantities, enters the network as BO₃, and breaks down the aluminate lattice composed of AlO₄- tetrahedron and causes a strong depolymerisation. While larger additions of boron cause the appearance of BO₄ which strengthens the aluminate lattice and reduces polymerization.

These first results are encouraging and important for the fundamental understanding of the role of the constituting elements of the clinker, but also from an environmental perspective since it will give us tools to better understand the mechanism of formation of a "green" clinker. Key questions on the structure and properties of glasses, include one of the oldest one about the role of the constituent elements of the glasses. Some elements, such as, Ge, B are network formers elements, while the alkaline and the alkaline earth are either "lattice modifier = lattice breakers" or compensators of lattice charge deficits. These concepts are taught, but they had never been shown. Using Ca and K X-ray absorption edge spectroscopy, we were able to evidence those concepts and therefore have a better understanding of redox and nucleation processes in glasses.

4. Geosciences and ore prospection

The use of materials from natural resources in production and consumption processes has many environmental and economic consequences including the rate of extraction and depletion of renewable and non-renewable natural resource stocks, the environmental pressures associated with extraction, processing, transport and use. New tools for a better, safer, cleaner prospection are needed as well as tools to

Relations internationales & partenariats / International relationships & partnerships

saine, ainsi que pour mesurer les impacts environnementaux. Le projet MESSIDOR et MELODI, en partenariat avec CREOCEAN et CADDEN, a permis le développement de nouveaux drones pouvant détecter la signature magnétique des sites de conduits océaniques hydrothermaux actifs ou inactifs. De tels sites pourraient être identifiés comme de nouvelles ressources pour l'industrie minière. Le projet MESSIDOR a ainsi remporté le concours mondial de l'innovation 2030. Des brevets ont été déposés pour cette technologie de drone.

Le radon est produit par la décroissance radioactive du radium 226, que l'on trouve dans le minerai d'uranium. La détection du gaz radon peut être un indicateur fiable de la présence d'uranium, c'est donc une technique fréquemment utilisée pour l'exploration de ce minerai. Ce type de détection a permis de découvrir des stocks d'uranium dans le monde entier. Il est donc nécessaire de modéliser les flux de radon associés au minerai d'uranium pour améliorer les outils de prospection et évaluer l'impact passé et présent de ces sites miniers sur l'environnement. C'est le cœur du projet développé en partenariat avec AREVA, à travers des mesures en laboratoire des concentrations en radium dans les sols et des échantillons issus de puits de forage contenant de l'uranium. ■

measure the environmental impacts. The MESSIDOR and MELODI project in partnership with CREOCEAN and CADDEN developed new drones that can detect the magnetic signature of active and inactive oceanic hydrothermal vent sites. Such sites could be identified as new resources for the mining industry. The MESSIDOR project has been the winner of the competition "Concours Mondial de l'Innovation 2030". Patents were submitted for the developed drone technology.

Radon gas is produced by the radioactive decay of radium-226, which is found in uranium ores. Radon gas detection can be a reliable indicator of the presence of uranium and its radon measurement is a technique frequently used in uranium exploration. Radon surveys have been responsible for uranium deposit discoveries worldwide. There is thus a need for modelling Radon fluxes associated with Uranium ore to improve prospection tools and trace ancient and present mining site impact in the environment. This is the core of the project developed in partnership with AREVA through laboratory measurements of the effective Radium concentrations in soils and borehole samples crossing a uranium ore. ■

Chercheurs invités 2016-2017 2016-2017 visiting researchers

- | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Alexander SHAPOVAL |  Bruce FEGLEY |  Martin BIZZARRO |
|  Elena BLANTER |  Katarina LOODERS |  Jonathan EREZ |
|  Ivan PSENCIK |  Grant HENDERSON |  Sohei SUKENAGA |
|  Vladimir PAVLOV |  Vladimir KOSSOBOKOV |  Nugroho, Dwi HANANTO |
|  Andrey KHOKHLOV |  Alexander GONTCHAROV |  Tamara GUDKOVA |
|  Petr SHEBALIN |  Sudhir RAJAURE |  Jennifer DRUHAN |
|  Daniele CARBONE |  Esteban ROUGIER |  Tuncay TAYMAZ |
|  Inessa VOROBYEVA |  Vladimir SMIRNOV |  Roberto MORETTI |
|  Anne BECEL |  Renata LUKYANOVA |  Mark KURZ |
|  Jairo Francisco SAVIAN |  Ranjith KUNNATH |  Paul JOHNSON |
|  Vittorio ZANON |  Vadim KRAVINSKI |  Denton EBEL |
|  Serguei KISELEV |  Binod SRENIVASSAN |  John BRODHOLT |
|  Donato BELMONTE |  Kumar ANIL |  Lin MA |
|  Ivan KULAKOV |  Alberto SAAL |  Ziyadin CAKIR |
|  Martin SCHIMMEL |  Mathias MORZFELD |  James FARQUHAR |
|  Jerome NEUFELD |  Frédérique LECLERC |  Maria SACHPAZI |
|  Ali ISMAEL ZADE |  Gaetano FESTA |  Robert VAN DER HILST |
|  Alexander GORSHKOV |  Donald Bruce DINGWELL |  Paul SAVAGE |
|  Alessandro FORTE |  Jiubin CHEN |  Craig MANNING |
|  Christopher GOLDFINGER |  O Leary GONZALEZ MATOS |  Lisa MAYHEW |





Vie de l'établissement

Institution's life



La Soufrière cachée dans les nuages lors des Journées du patrimoine 2017 à l'observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe.
The Soufrière hidden in the clouds during 2017 Heritage Days at the volcanological and seismological observatory of Guadeloupe.

L'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise à la Réunion (OVPF) ouvre ses portes au public quelques jours par an pour accueillir des étudiants de l'université de la Réunion et de l'école des Mines lorsqu'ils sont de passage sur l'île ; mais également pour accueillir des équipes de tournage pour des documentaires ou lors d'éruptions volcaniques.



The Volcanological Observatory of Piton de la Fournaise (OVPF) opens its doors to the public several days a year to host students from the University of Reunion Island and the École des Mines while they are on the Island, or to host film crews for documentaries or during volcanic eruptions.

Avec Mac Lesggy, présentateur TV animant l'émission scientifique E=M6.
With Mac Lesggy, famous French TV presenter hosting the science show E=M6.



© Stéphane Félicité

© OVPF - IPGP

© OVPF - IPGP



© Stéphane Félicité



© IPGP



© IPGP



© Clément Stalberger

La 13^e édition du Festival international du film scientifique Pariscience a accueilli plus de 10 000 spectateurs lors des 73 séances réparties entre l'IPGP et le Muséum d'Histoire naturelle. Cette édition a aussi été l'occasion de séances en réalité virtuelle dans la médiathèque de l'institut.
 The 13th edition of the Pariscience international scientific film festival welcomed more than 10,000 viewers over 73 showings between the IPGP and the Natural History Museum. This edition also offered virtual reality sessions in the institute's media library.

Pour la Fête de la science 2016, l'IPGP a proposé au grand public et aux scolaires de venir découvrir pendant 3 jours des expositions, des conférences, des projections et des ateliers dans les laboratoires de recherche de l'institut.
 For the 2016 Fête de la Science, the IPGP opened up to the general public and to schoolchildren to offer during 3 days exhibitions, conferences, film screenings and workshops in the institute's research laboratories.



© IPGP

Tournage du film "Dans la brume", film catastrophe avec Romain Duris.
 Shooting of "Dans la brume", a disaster film with the famous French actor Romain Duris.



© IPGP



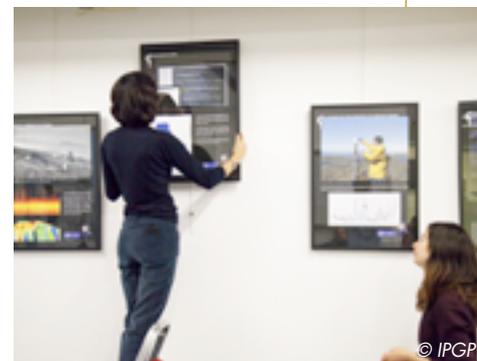
© Univ. Paris Diderot



© Univ. Paris Diderot

L'équipe de planétologie et sciences spatiales a proposé 3 ateliers lors de l'édition 2017 : Exodune 360, l'exploration des dunes du systèmes solaires en réalité virtuelle et Planet-Expo, qui ont remporté un franc succès.
 The planetary and spatial science team hosted 3 workshops for the 2017 Fête de la Science: Exodune 360, virtual reality exploration of solar system dunes and Planet-Expo, which were very successful.

Expositions photos "Des minéraux aux vitraux, une plongée dans le manteau" et "Au delà des perceptions" organisées par des doctorants de l'IPGP.
 Photography exhibitions "From minerals to stained glass, a dive into the mantle" and "Beyond Perceptions" organised by IPGP PhD students.



© IPGP

Création musicale géoscientifique "PhiloGaia Orchestra" pour le Festival des idées 2016, réunissant des géomusiciens internationaux s'inspirant d'images de notre planète pour composer et improviser des morceaux.
 Geoscientific musical creation, "PhiloGaia Orchestra", for the 2016 Paris Festival des Idées which brought together international geo-musicians drawing inspiration from images of our planet to compose and improvise musical pieces.



© IPGP

UNIVERSITÉ PARIS 2019

« Une université de rang mondial, dans une ville monde, reconnue pour ses programmes éducatifs innovants, son excellence scientifique, sa capacité à relever de grands défis sociétaux, et mettant en oeuvre une véritable vision stratégique. »

UNE UNIVERSITÉ PLURIDISCIPLINAIRE AU COEUR DE PARIS

- > SCIENCES DE LA TERRE, DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'UNIVERS
- > SANTÉ ET MÉDECINE
- > HUMANITÉS, SCIENCES SOCIALES, DROIT
- > SCIENCES EXACTES ET INGÉNIERIE

UNIVERSITEPARIS2019.FR

