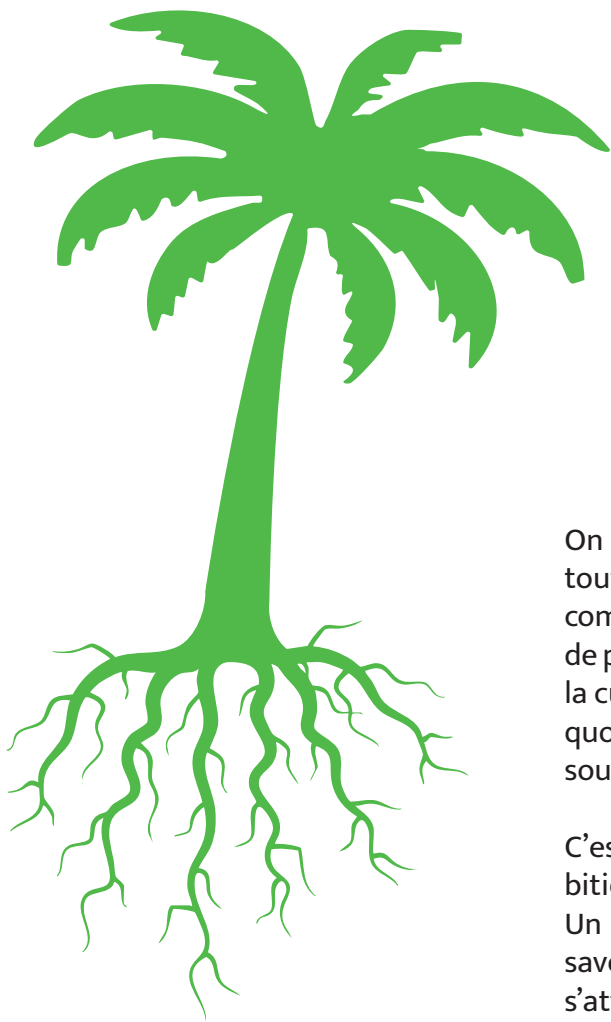


PALMIER

L'EFFET

15 secondes
au coeur du globe

Juin 2025



L'ÉDITO

On est un petit groupe d'élèves de seconde, venus d'un peu partout en France — d'Amiens à la Haute-Savoie — avec un point commun : une vraie passion pour les sciences. Pas juste les cours de physique-chimie ou SVT au lycée, non. Ce qui nous anime, c'est la curiosité. Le besoin de comprendre ce qui nous entoure. Pourquoi les choses sont comme elles sont ? Qu'est-ce qui se cache sous nos pieds, au-dessus de nos têtes, au fond des océans ?

C'est ce genre de questions — parfois naïves, parfois très ambitieuses — qui nous a poussés à postuler à ce stage à l'IPGP. Un endroit où la Terre raconte son histoire à celles et ceux qui savent l'écouter. Et franchement, on ne savait pas trop à quoi s'attendre mais on a été surpris. Dans le bon sens.

Pendant quelques jours, on a découvert un monde qu'on connaissait à peine. On a parlé d'ondes sismiques, de planètes lointaines, de volcans sous-marins... On a rencontré des chercheurs passionnés (et passionnants), visité des lieux incroyables comme la galerie minéralogique de Sorbonne Université, et surtout, on a commencé à se projeter : et si, plus tard, c'était nous, à leur place ?

Ce magazine, c'est un petit bout de cette aventure. On y a mis nos découvertes, nos questions, nos émerveillements. Pas pour faire un exposé, mais pour partager un peu ce qu'on a vécu. Ce qu'on espère, c'est que ça vous donne, vous aussi, envie de regarder le monde autrement. D'être curieux. De poser des questions. Et peut-être même de rêver un peu plus grand.

Bonne lecture !

Assil Abdessadok & Rachelle Mkavavo

L'effet Palmier

Une revue scientifique par des élèves de seconde pour la diffusion des sciences auprès du plus grand nombre.

Équipe de rédaction

Assil Abdessadok

Lycée Robert Schuman, Charenton-le-Pont

Arthémus Beaujean

Lycée Madeleine Michélin, Amiens

Eva Calvet

Lycée Vaugelas, Chambéry

Thomas Carré

Lycée Teilhard de Chardon, Saint-Maur-des-Fossés

Arwen Caton

Institut de l'Alma, Paris

Clara Célarine

Lycée privé « Présentation de Marie », Saint-Julien-en-Genevois

Sarah Combettes

Lycée Robert Schuman, Charenton-le-Pont

Léa Costa-Bichler

Lycée Maurice Ravel, Paris

Emmanuel Ilic

Lycée Notre-Dame de la Providence, Vincennes

Valentin Jaubert

Lycée Henri IV, Paris

François Langendorff

Institut de la Tour, Paris

Simon Mattéoli

Lycée Louis Legrand, Paris

Camille Mercier

Lycée Joséphine Baker, Hanches

Rachelle Mkavavo

Lycée polyvalent, Cachan

Garance Trolet

Lycée Robert Schuman, Charenton-le-Pont

SOMMAIRE



GÉOPHYSIQUE



Invisible à nos yeux, mais omniprésente dans notre quotidien, la géophysique interne est la science qui explore les profondeurs de la Terre à l'aide des différentes lois de la physique. Elle permet d'explorer en profondeur, de localiser des nappes d'eau souterraines, du pétrole ou des minerais, et de mieux comprendre l'histoire de notre planète. Grâce aux ondes sismiques, aux champs magnétiques ou à la gravité, les géophysiciens dévoilent les secrets de l'intérieur terrestre comme un médecin utilise un scanner pour observer le corps humain.



Volcanologie

Les volcans se trouvent partout sur Terre. Ils sont essentiels au fonctionnement de notre planète et des écosystèmes qui les entourent. En les étudiant, les scientifiques peuvent non seulement mieux comprendre le passé de la Terre, mais aussi prédire son avenir, d'un point de vue géologique et géochimique. Pendant notre stage, nous avons eu la chance d'échanger avec des chercheurs spécialisés dans ce domaine. Cette article présente ce que nous avons découvert à leurs côtés.



Photo de l'éruption du volcan Copahue en 2012. © IPGP

Vocabulaire

¹ La tectonique des plaques est la théorie selon laquelle la surface de la Terre est découpée en plaques rigides qui se déplacent lentement, provoquant séismes, volcans et formation de montagnes.



Le saviez-vous ?

Il existe un volcan en éruption depuis 25 ans !

Les volcans se trouvent principalement entre les plaques tectoniques. Cela est dû au mouvement du manteau qui entraîne la subduction qui forme les volcans. Sans cette théorie de la tectonique des plaques¹, on aurait beaucoup moins de volcans sur Terre. Pourtant, il y a aussi des volcans qui se forment au milieu de certaines plaques parce qu'il existe des points chauds où la lave monte et entraîne un volcan. Par exemple, Hawaï et les Açores sont d'anciens volcans de cette sorte.

Les volcans sont aussi classés par niveau d'activité : « actifs », ce sont ceux qui ont une éruption en cours ; « endormis », ce sont ceux dont la dernière éruption remonte à moins de 10 000 ans (ou 100 fois le temps moyen entre deux éruptions, selon les classifications) ; et éteints, qui sont des volcans « endormis » ayant dépassé les dé-

lais décrits ci-dessus.

Un volcan se caractérise à la surface par un dôme créé par des coulées de lave. Il est formé en souterrain de deux réservoirs magmatiques alimentés par le manteau. Le dôme est fermé par un bouchon de roches, et quand la pression dans le réservoir supérieur dépasse la résistance du dôme, celui-ci explose et une éruption se produit. Selon la pression dans le réservoir lors de l'éruption et la viscosité du magma, différents types d'éruptions peuvent se produire. Il en existe deux grandes familles : les effusives avec des grandes coulées de lave mais des rejets de gaz et de cendres ; et les explosives avec une grande explosion projetant beaucoup de gaz, de cendres et de roches dans les airs, pouvant retomber et former des nuées toxiques très chaudes qui dévalent les pentes à quelques centaines de kilomètres



par heure, ou rester dans le ciel et former des nuages toxiques pouvant bloquer le trafic aérien et la lumière, ainsi que des coulées de lave lentes, mais plus chaudes que celles des éruptions effusives.

Précisément, les volcanologues classent les éruptions en cinq catégories par ordre de dangerosité croissante : « hawaïenne » avec de la lave fluide et lente et peu ou pas d'explosion, comme le Mauna loa ; « strombolienne » avec des petites explosions, régulières et localisées, comme le Stromboli ; « valcanienne » avec des explosions plus violentes, des nuages de cendres et des projectiles, comme à la Soufrière ; « surtseyenne » (Phréatomagnétique) avec des explosions très violentes causées par le contact entre l'eau et le magma, comme les îles de Surtsey ; « Péléenne » : nuée ardente très rapide et très chaude comme la montagne Pelée ; « plinienne » exhibant des colonnes de cendres très hautes, des explosions massives et des chutes de cendres à grande distance, comme le Vésuve et Pompéi.

Les systèmes hydrothermaux volcaniques sont très importants pour comprendre le fonctionnement d'un volcan. Les chercheurs utilisent plusieurs outils pour étudier l'intérieur des volcans, en particulier la tomographie de résistivité électrique 3D. Cette méthode consiste à envoyer un courant électrique dans le sol à l'aide d'électrodes afin de mesurer comment ce courant circule sous terre. Cela permet de repérer les zones où se trouvent des fluides chauds, comme l'eau ou le gaz.

Ils utilisent aussi des méthodes de géophysique, comme la mesure de petits séismes provoqués par les mouvements internes (sismicité), ou la déformation du sol, pour surveiller l'activité du volcan. En plus, ils font de l'observation sur le terrain, par exemple en marchant autour du volcan pour poser des capteurs ou observer les fumerolles. Toutes ces données sont ensuite utilisées dans des modèles numériques, qui permettent de mieux comprendre le comportement du volcan et de détecter les risques d'éruption ou d'instabilité.

La géochimie volcanique est une méthode qui permet d'étudier la composition chimique des gaz, de l'eau et des particules



Photo du volcan de la Soufrière en Guadeloupe en éruption. © Marina Rosas-Carbajal

émises par les volcans. Par exemple, un lac acide dans un cratère peut changer quand l'activité volcanique augmente. On peut alors mesurer s'il y a plus de gaz tels que le dioxyde de carbone (CO_2) ou le dioxyde de soufre (SO_2). On peut aussi analyser les petites particules dans l'eau ou dans l'air. Si ces valeurs changent, cela peut indiquer que du magma est en train de monter sous le volcan. Les scientifiques utilisent pour cela des capteurs, ou même des drones, pour mesurer les gaz volcaniques. Grâce à la géochimie, ils peuvent mieux surveiller les volcans et parfois prévoir une éruption. C'est une méthode très importante, qui complète les observations géophysiques.

Enfin, il est aussi très important et utile de maîtriser des outils technologiques comme la programmation informatique (le code). Cela permet de créer des logiciels ou des plateformes pour organiser, visualiser et analyser les données recueillies sur le terrain. L'équipe de volcanologie que nous avons rencontrée a par exemple créé un site web appelé VolcAshDB.ipgp.fr, qui est une base de données d'images au microscope optique et de caractéristiques physiques (forme, texture et couleur) de particules de cendres volcaniques. L'objectif est de contribuer à l'établissement d'une méthodologie standardisée pour la classification des particules de cendres volcaniques. Ce site permet aux scientifiques, mais aussi au grand public, d'identifier les roches et particules trouvées sur le terrain ou d'en apprendre davantage sur les volcans.

Léa Costa-Bichler & Valentin Jaubert

Vocabulaire

Un **aléa** est une probabilité qu'un événement se réalise.

Un **risque** est un dégât potentiel.



Le saviez-vous ?

Les volcans émettent environ 1% du CO_2 rejeté chaque année sur Terre. L'activité humaine, elle, en produit 100 fois plus, notamment à cause des combustibles fossiles. Ce ne sont donc pas les volcans, mais l'Homme, qui est le principal responsable du réchauffement climatique.

Sismologie

L'origine du terme *sismologie* provient du grec *sismo* qui signifie *secousse ou tremblement de terre*, et *logie* qui signifie *étude*. Donc la sismologie se définit par l'étude des phénomènes sismiques !

Qu'est-ce que la tectonique des plaques ?

Il existe 12 plaques tectoniques principales à la surface du globe terrestre telles que les plaques Pacifique (la plus grande, mesurant 2,57685 stéradians¹), nord-américaine, eurasiennne ou Nazca. Étudier la tectonique des plaques permet de comprendre leur dynamisme (vitesse, force, taille, etc.) La Terre est divisée par des plaques finies permettant de comprendre où se forment les séismes.



Le saviez-vous ?

Toutes les plaques tectoniques ne se déplacent pas à la même vitesse ! La plaque Pacifique, la plus grande, se déplace d'environ 12 cm par an, comme la pousse des cheveux en 1 an !

Comment se forme un séisme ?

Un séisme correspond aux mouvements des sols terrestres. L'origine de tous séismes débute par l'apparition d'une faille : une zone plus faible dans la roche en profondeur (généralement située à plus de 30 km dans la croûte terrestre). Lors de la présence d'une faille, deux roches exercent une même force l'une contre l'autre. Elles tiennent à l'aide de petites aspérités² présentes sur elles. Le séisme est donc formé par la rupture de ces deux roches : sous terre on parle de foyer, à la surface cela correspond à l'épicentre du séisme. Lors de cette rupture, des ondes sont propagées. Il existe 2 grands types d'ondes : les ondes de volume et les ondes de surface. Dans les ondes de volumes on retrouve les principales (de compression) et les secondaires (de cisaillement : celles-ci sont les plus dangereuses en raison de leur forte amplitude faisant de plus grands dégâts).

Les progrès dans le temps

Longtemps, la connaissance des tremblements de terre est restée faible dans de nombreux pays, dont la France. En revanche, certaines régions du monde, comme le Japon, disposaient d'un trésor historique : plus de 5000 ans de récits relatant des événements sismiques.

L'histoire de la détection des séismes commence très tôt. Dès l'Antiquité, la Chine se

distingue par une innovation remarquable. En 132 après J.-C., l'astronome et ingénieur Zhang Heng conçoit le premier détecteur de séismes, connu sous le nom de sismoscope. Cet appareil rudimentaire montrait déjà les débuts de la sismologie.

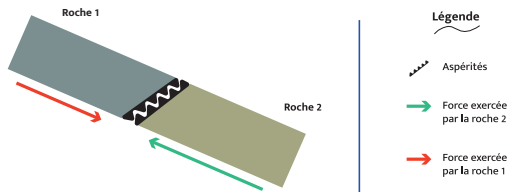
Ce n'est qu'au XIX^{ème} siècle que les choses s'accélérent ensuite. En 1885, l'italien Luigi Palmieri met au point un des tous premiers sismographes modernes, basé sur un système de tubes remplis de mercure capables de réagir aux vibrations du sol.

Mais l'évènement de trop intervient en 1880, après un violent séisme ayant secoué la ville de Yokohama, au Japon. Trois scientifiques britanniques : John Milne, James Ewing et Thomas Gray s'unissent pour concevoir alors un nouveau sismographe : un dispositif capable d'enregistrer les mouvements du sol sur un tambour rotatif à l'aide d'une plume. Cet instrument deviendra la référence et le fondement de la sismologie contemporaine.

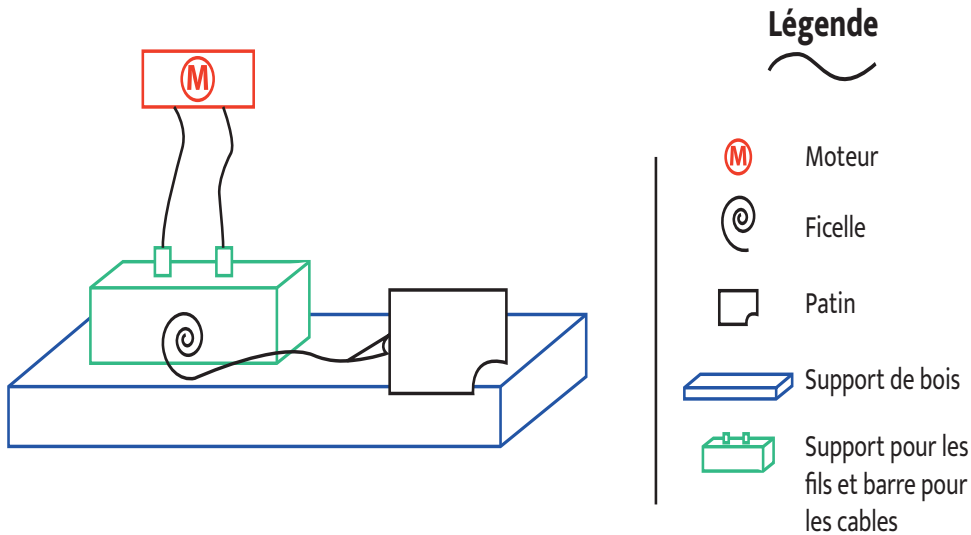
Tout au long du XX^{ème} siècle, les progrès se poursuivent avec l'émergence de réseaux sismiques nationaux et internationaux permettant une couverture de plus en plus fine des activités sismiques. L'avènement de l'électronique donne naissance à une nouvelle génération d'appareils : les sismomètres électromagnétiques, capables d'enregistrer les ondes sismiques sur bande magnétique.

Aujourd'hui, la science franchit une nouvelle étape grâce aux technologies satellitaires, aux capteurs ultrasensibles et aux GPS de haute précision. Ces outils de pointe permettent non seulement de détecter les moindres secousses, mais aussi de cartographier les plaques tectoniques à la perfection.

Quelles sont les expériences observées ?



Expérience 1 : Ces 2 blocs de mousse représentent 2 roches qui exercent une force l'une contre l'autre. Elles sont accrochées ensemble par de petites aspérités.



Expérience 2 : Ce schéma permet d'expliquer le mouvement des plaques tectoniques en continu. Lorsque le moteur est relié par des câbles à la bobine de fil, celle-ci se met à tourner dans le sens des aiguilles d'une montre pour ramener le patin vers elle. Pascal Bernard a ensuite rajouté un élastique entre la ficelle et le patin pour simuler la rupture entre 2 roches, la rupture d'une faille en profondeur. On a pu observer le patin qui se rapprochait de la bobine de fil en faisant des à-coups. Cet élastique a permis de modéliser une roche élastique, car oui toute roche est élastique, même si ce n'est pas visible à l'œil nu !

Peut-on les prédire et comment les prévenir ?

« Imaginez la Terre pour mieux l'imaginer »

Jean-Paul Montagner

Puisque le mouvement des plaques est irrégulier, il est aujourd'hui impossible de prédire précisément la survenue d'un séisme. Cependant, il n'est pas impossible de s'en prémunir ou de s'y préparer. C'est là que la prévention et certaines formes de prévisions entrent en jeu. Plusieurs moyens technologiques permettent d'étudier l'activité sismique : la tomographie sismique, les GPS, les satellites ou encore les capteurs. Bien qu'ils ne permettent pas de prévoir exactement le moment d'un séisme, ils sont utiles pour en analyser les causes et en estimer la probabilité.

dèles statistiques et à l'étude des failles, les scientifiques peuvent estimer la probabilité qu'un séisme se produise dans une région donnée. Cette approche ne permet pas une prévision exacte, mais constitue un outil essentiel de la gestion des risques.

La prévention, quant à elle, joue un rôle central. Elle vise à réduire les dégâts potentiels en cas de séisme : constructions parasismiques, exercices d'évacuation, campagnes de sensibilisation, ou encore plans de sécurité mis en place dans les pays à haut risque. Un bon exemple est celui du Japon. Ce pays utilise des capteurs sismiques capables de détecter les premières ondes (ondes P) et d'envoyer une alerte quelques secondes avant l'arrivée des ondes destructrices (ondes S). Cela permet à la population de se protéger, de couper le gaz, ou d'arrêter les trains par exemple, limitant ainsi les conséquences humaines et matérielles.

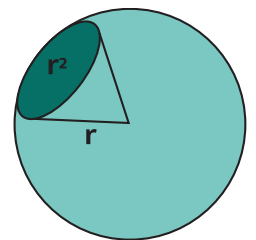
En effet, grâce à la cartographie, aux mo-

Clara Célanire & Rachelle Mkavavo



Le saviez-vous ?

¹ Un stéradian est l'unité de mesure des angles solides dans le Système international.



² Une aspérité est une inégalité qui rend la surface d'une roche rugueuse.

Nobuaki Fuji

Quand la Terre résonne entre science et art, un géophysicien écoute battre le coeur de la planète !



Le saviez-vous ?

Il a connu un séisme à l'âge de 12 ans à Kobe en 1995 !

Nobuaki Fuji, maître de conférences à l'Institut de physique du globe de Paris est un chercheur dont le travail s'étend bien au-delà des frontières traditionnelles de la géophysique. Spécialiste des formes d'ondes sismiques et de leur modélisation, il s'intéresse aussi bien à la structure de la Terre qu'aux volcans. Mais son originalité réside dans son engagement en faveur de l'interdisciplinarité. Pour ce scientifique, l'art et les sciences sont reliés, faisant tous deux appels aux émotions et à la créativité.

Il a récemment contribué à l'ouvrage collectif « Évolution, Science, Art et Littérature » où il propose une réflexion personnelle sur l'évolution mêlant sciences de la Terre et création musicale avec son basson. Son chapitre intitulé « Évolution vue par un géophysicien » illustre comment les rythmes internes de la planète peuvent inspirer des résonances artistiques, ce qui témoigne d'une vision sensible et créative de la recherche scientifique.

Sur le plan technique, il travaille avec des artistes et communique son travail avec le grand public.

Il s'intéresse à l'évolution de la Terre et des planètes en développant des méthodes numériques de propagation des ondes sismiques notamment à leur détection, à leur localisation et à leur caractérisation.

Il travaille également sur les volcans et plus

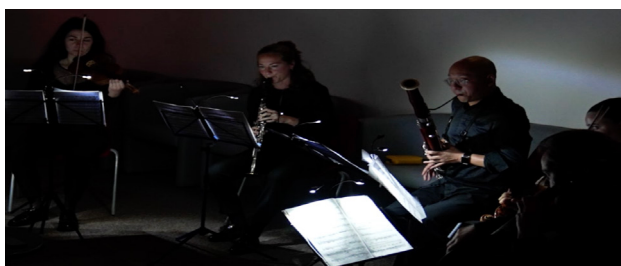
*Portrait du sismologue théoricien, compositeur et enseignant-chercheur d'origine japonaise, Nobuaki Fuji, d'origine japonaise, né à Kobe.
© Institut universitaire de France*



particulièrement sur le mont Fuji. Mais, pour lui les volcans représentent des créations destructrices de la nature qui ne sauraient ressentir la moindre empathie.

Ainsi, Nobuaki Fuji nous ouvre de nouvelles perspectives sur la compréhension de notre planète.

Arwen Caton



Nobuaki Fuji interprétant sa composition accompagnant le film de George Méliès lors de la Nuit blanche lunaire le 09 novembre 2024. © Pôle spatial université Paris Cité

Géosciences marines

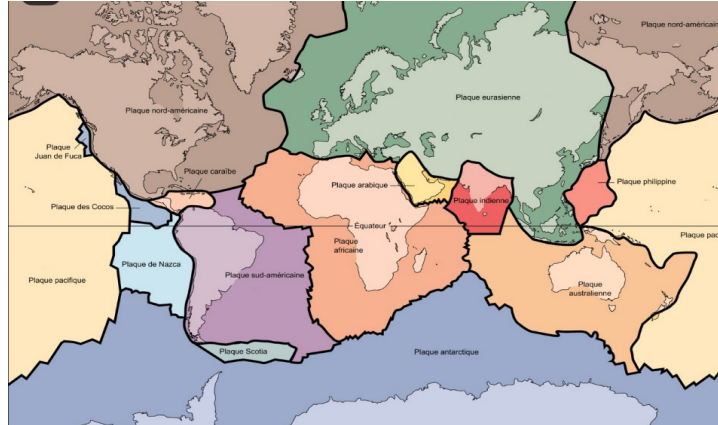
Que sont les géosciences marines ?

Les géosciences marines sont l'étude des fonds marins et des phénomènes géologiques sous les océans. Elles aident à comprendre comment la Terre fonctionne sous la mer : la formation des océans, le déplacement des continents, ou encore la vie dans les profondeurs extrêmes.

La surface de la Terre est divisée en grandes plaques solides qui bougent très lentement. Ces mouvements expliquent pourquoi les continents changent de place et pourquoi il y a des volcans ou des tremblements de terre. Autrefois, tous les continents formaient un seul supercontinent, appelé la Pangée. Puis, ils se sont déplacés peu à peu pour former les continents actuels. C'est ce qu'on appelle la dérive des continents. C'est Alfred Wegener qui a proposé cette idée en 1912. Il avait remarqué que certaines côtes semblaient s'emboîter, comme celles de l'Afrique et de l'Amérique du Sud. Sa théorie a été confirmée plus tard avec la découverte des plaques tectoniques.

La croûte continentale est plus vieille (jusqu'à 4 milliards d'années) et composée de roches légères comme le granite, tandis que la croûte océanique est plus jeune (moins de 200 millions d'années) et formée de roches plus denses comme le basalte.

Au fond des océans, il existe des zones où de l'eau très chaude sort du sol : ce sont les systèmes hydrothermaux. L'eau de mer s'infiltre dans le sol, se réchauffe au contact du magma, puis ressort chargée de minéraux à très haute température (jusqu'à 400 °C), formant des cheminées hydrothermales. Malgré l'obscurité et la chaleur, la vie existe autour de ces cheminées. Des bactéries produisent de l'énergie grâce aux minéraux (chimiosynthèse), et elles nourrissent des vers, crevettes et autres animaux adaptés à ce monde extrême.



Les plaques tectoniques terrestres

© - http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7a/Tectonic_plates-fr.png

L'étude des fonds marins

L'étude des fonds marins est longue et compliquée. Pour récupérer des échantillons, les chercheurs embarquent sur des bateaux océanographiques pour un voyage de plusieurs mois. Ces bateaux peuvent accueillir différents nombres de scientifiques. Par exemple, le Pourquoi Pas, de la flotte océanographique française peut accueillir une quarantaine de scientifiques pour une vingtaine de marins. Ces bateaux possèdent de nombreux équipements pour aider les chercheurs à faire des prélèvements comme des sous-marins, des dragues ou encore des ROV connectés à des écrans à bord.

Un ROV est un véhicule sous-marin téléopéré. Il est contrôlé à distance, contrairement aux robots sous-marins autonomes (AUV). Les ROV sont équipés d'espaces de rangement et de bras mécaniques. Ils peuvent descendre plus ou moins en profondeur selon les modèles. Par exemple, le Victor 6000 a la capacité de descendre à 6000 mètres de profondeur au maximum.

Les AUV sont des sous-marins autonomes par conséquent, ils ne sont pas habités. AsterX et IdefX sont deux robots autonomes et polyvalents s'occupant de la surveillance



Le saviez-vous ?

La lave « fraîche » est encore pleine de gaz qui s'échappe sous l'effet de la différence de pression, ce qui produit le bruit d'une grappe de pétards tout en produisant de petits éclats qui fusent.



Le saviez-vous ?

La surface de Mars est globalement mieux connue que celle de la Terre, notamment à cause du fait que 67% de la surface de la Terre est couverte par l'océan. Cependant à l'échelle locale la Terre est bien évidemment mieux connue.

et de la cartographie des sites. Ils peuvent plonger jusqu'à 2850 mètres et parcourir une distance de 100 kilomètres sous l'eau. Ils sont souvent envoyés à 70 mètres du fond mais parfois plus près pour une cartographie plus précise.

Les sous-marins habités sont utilisés moins fréquemment que les ROV car ils sont plus coûteux et plus difficiles à déployer en raison de la longueur des plongées. Le Nautille est le plus connu. En effet il fait partie de la flotte océanographique française et peut aller dans 97 % des fonds marins. Il est utilisé quand les scientifiques ont besoin de voir eux même les sites. L'équipage comprend deux pilotes et un scientifique.

Pour récolter des échantillons autrement qu'avec des robots et des sous-marins, les scientifiques utilisent des forages pour récupérer des carottes sous le sol marin. Pour ce faire, un carottier est enfoncé dans le sol. À son extraction, la pression fait un effet ventouse et l'échantillon est prélevé sous forme cylindrique. La fabrication du carottier est longue car il doit faire plusieurs mètres de long pour pouvoir prélever en profondeur. Cependant cette technique est appréciée des chercheurs en raison de la précision des prélèvements. Une autre technique fréquemment utilisée est le dragage. Elle consiste à racler les fonds marins à l'aide d'un filet métallique pour récupérer des roches dans des zones données.

Les chercheurs et scientifiques posent également des sismomètres régulièrement au fond des océans. Une fois la pose effectuée, ils restent environ 9 mois sous l'eau jusqu'à ce que l'équipe scientifique vienne le rechercher. Ils servent à mesurer les séismes sous-marins, dans certains cas à prévoir les éruptions volcaniques sous-marines et à déduire la localisation des volcans sous-marins.

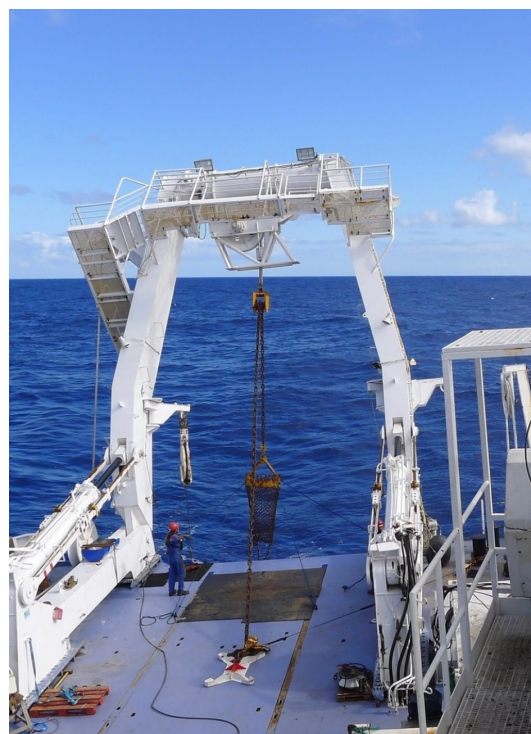
Les thermomètres sont placés dans les bouches des systèmes hydrothermaux pour y mesurer la température et donc la concentration en minéraux.

Focus sur le Fani Maoré : un volcan à Mayotte

En mai 2018, l'observatoire sismologique de Mayotte (REVOSIMA) enregistre un grand



Le nautille à La Vilette, Paris © [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nautille_\(sous-marin_de_poche\)_-_La_Vilette_-_Paris_-_2003.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nautille_(sous-marin_de_poche)_-_La_Vilette_-_Paris_-_2003.JPG)

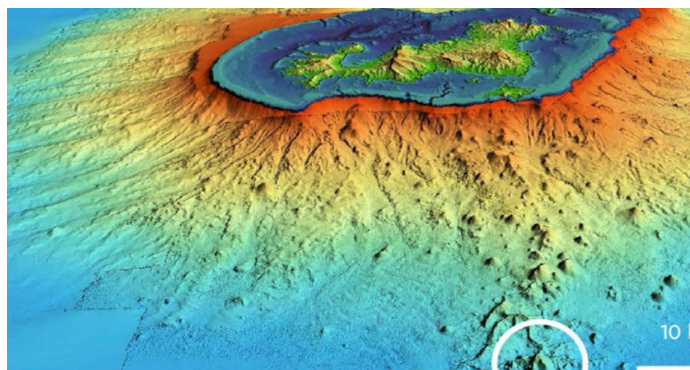


Drague prête à être mise à l'eau © ifremer, VESPA



Le Pourquoi pas, un navire océanographique français de l'ifremer et de la Marine nationale © https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9e/IFREMER_-_Pourquoi_pas_%3F.JPG/1004px-IFREMER_-_Pourquoi_pas_%3F.JPG

nombre de séismes de faibles magnitudes (moins de 4 sur l'échelle de Richter) mais aussi quelques uns de magnitudes (à raison



Découverte d'un nouveau volcan à Mayotte

© Équipe Mayobs CNRS / IPGP / ifremer / BRGM / université Paris Cité

de 80 par jour au plus fort de la crise) plus élevées (4-5) ressentis par la population, qui pour partie dort dehors par crainte des séismes. À cela s'ajoute la découverte par des pêcheurs de poissons réputés vivre au fond de l'eau et sentant le brûlé. L'autopsie de ces poissons montrent qu'ils ont été victime de la décompression comme s'ils étaient remontés trop vite des fonds marins. Tous ces événements conduisent la préfecture à demander une étude au CNRS. La campagne d'étude a été menée de juin 2018 à décembre 2020 et a permis d'améliorer les modèles de sismologie qui avaient localisé les séismes au mauvais endroit, de cartographier les fonds marins à l'est de

Mayotte, de découvrir un nouveau volcan sous-marin nommé le Fani Maoré et de collecter des échantillons de lave.

Ce volcan est particulier pour de nombreuses raisons. La première est son activité sismique, qui contrairement à celle des autres volcans, vient par grappes. C'est-à-dire que les séismes sont émis par petits groupes sans continuité dans la magnitude, à l'inverse des autres volcans pour laquelle une série de petits séismes conduisent à un gros puis inversement. De plus, son éruption a été entretenue par un mécanisme relativement rare. Le magma est remonté dans deux réservoirs majoritairement dont l'un entretenait l'éruption. L'originalité vient du fait que le vidage du premier réservoir par l'éruption permettait la baisse de la pression du second réservoir par l'approvisionnement du premier réservoir ce qui entraînait la baisse du niveau du second réservoir, qui soutenait un piston. Or la baisse du niveau du second réservoir a entraîné la descente du piston ce qui maintenait la pression dans les réservoirs. Les scientifiques estiment que ce piston est descendu d'une centaine de mètres environ. Enfin, cette éruption fut la plus monitorée jamais enregistrée pour un volcan sous-marin. La communauté scientifique possède donc une grande quantité de données sur cette éruption, ce qui permet notamment la reclassification de Mayotte dans l'échelle des risques volcaniques, plus particulièrement à cause du risque de submersion (Mayotte est descendue de quelques centimètres et s'est déplacée d'une quinzaine de centimètres vers l'est).

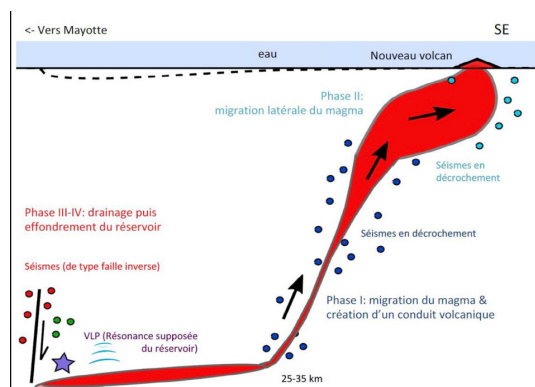


Illustration des quatre étapes de la crise volcanologique au large de Mayotte. Phase I (en bleu foncé) : ouverture d'un passage pour le magma vers la surface, associée à une forte sismicité avec des mécanismes en décrochement (mai-juin 2018).

Phase II (bleu clair) : migration latérale de la sismicité ; le magma atteint la surface et donne naissance à un volcan. L'éruption proprement dite commence, en juin 2018. Phases III et IV (en rouge) : drainage du réservoir, puis effondrement de ce réservoir à partir de septembre 2018. L'étoile en violet symbolise la localisation supposée des VLPs, c'est à dire de la résonance de la partie profonde du réservoir, à moins de 20 km de l'île de Mayotte. Cette résonance est détectée tout au long de la crise, avec une augmentation significative pendant la phase IV.

© Nature – Simone Cesca, Torsten Dahm, Eleanora Rivalta et Jean Letort

Valentin Jaubert & Garance Trollet

Mesurer la Terre

Voyage à travers différentes époques et techniques de mesure de la Terre.

¹ La trigonométrie est une branche des mathématiques qui traite des relations entre distances et angles dans les triangles.

² Un méridien est un cercle imaginaire passant par les deux pôles terrestres.



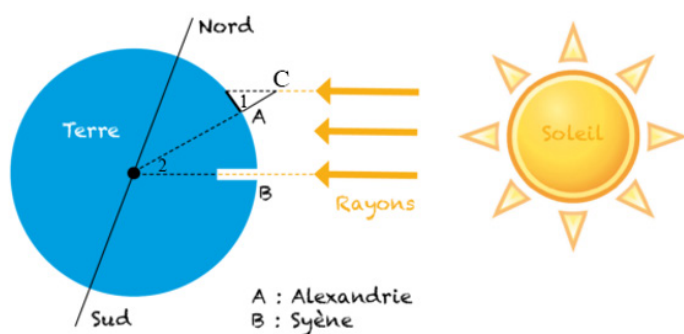
Le saviez-vous ?

La Terre n'est pas vraiment sphérique ! En effet, elle est aplatie d'environ 20 km aux pôles (sur 6378 km de rayon). Ceci est dû à sa rotation.

Depuis l'Antiquité, les Hommes ont toujours voulu étudier la forme de la Terre, la cartographier, pour se repérer dans l'espace et l'aménager. Cette science, la géodésie, regroupe mathématiques, astronomie et géophysique.

Les grecs avaient déjà conscience de la sphéricité de notre planète. Ils l'avaient remarqué grâce aux bateaux apparaissant à l'horizon : leurs voiles sont visibles avant leur coque. Parménide, philosophe grec du VI^{ème} siècle av. J.-C., parvient à expliquer les changements de phase de notre satellite : la Terre projette son ombre ronde sur la Lune, ce qui constitue une preuve de plus de la forme de la planète bleue.

Ératosthène, savant grec du III^{ème} siècle av. J.-C., est le premier homme à avoir calculé la circonférence de la Terre. Lors d'un voyage à Syène en Égypte, il remarque le reflet du soleil au fond d'un puits à midi le jour du solstice d'été et en conclut donc que ses rayons étaient perpendiculaires au sol. Le même jour à la même heure à Alexandrie, le soleil projette l'ombre d'un bâton. En mesurant l'angle des rayons de soleil grâce à cette ombre et en connaissant la distance entre les deux villes, Ératosthène parvient à calculer à l'aide de la trigonométrie¹ le rayon de la Terre, et en déduire sa circonférence. La valeur trouvée (39 375 km) est très proche de la réalité (40 070 km).



Qu'est-ce que le mètre ?

Un mètre a été défini à la fin du XIX^{ème} siècle comme le quart du méridien terrestre (d'un pôle à l'équateur) divisé par 10 millions. Aujourd'hui, il est défini par la distance que parcourt la lumière en une seconde divisée par 299 792 458.

Au XVII^{ème} siècle, Jean Picard (1620-1682), astronome français, mesure le rayon terrestre à l'aide de la méthode de triangulation. Cette technique consiste à mesurer les angles d'un ensemble de triangles pour déterminer la position précise de points sur le terrain. On commence par mesurer une base, puis les angles, et on forme un réseau de triangles. On peut donc connaître de cette façon les coordonnées du point d'arrivée par rapport à celui de départ pour ainsi calculer la distance entre les deux points. De cette façon, Picard obtient la valeur d'un degré de méridien² : 57 060 toises (environ 111 km). Cela a permis de cartographier plus précisément la France et de déterminer le rayon terrestre.

Cassini (1714-1784), un autre astronome et cartographe français, parvient à obtenir une mesure encore plus précise, dans la continuité des travaux de Picard.

Lors de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, sont développés des systèmes de localisation grâce à des satellites : TRANSIT, en 1964, développé par les américains, puis GPS (Global Positioning System). Par la suite, d'autres pays ont développé leur propre système : Galileo par l'Europe, GLONASS par la Russie, BeiDou par la Chine...

Arwen Caton & Simon Matteoli



Magnétisme

En grandissant, il arrive qu'on se pose des questions sur le monde qui nous entoure : comment fonctionne une boussole ? Pourquoi les aimants aimantent ? Qu'est-ce qui cause une aurore boréale ? À première vue, ces phénomènes semblent très différents... et pourtant, ils ont tous un point commun : le magnétisme.



Photographie d'une aurore boréale en Alaska. © United air force

Le magnétisme, c'est cette force qui permet à certains objets de s'attirer ou de se repousser, un peu comme de la magie... mais expliquée par la science ! Cette force provient de petites particules, appelées électrons, que l'on trouve à l'intérieur de chaque objet et qui bougent en créant un champ magnétique. Ce champ magnétique est essentiel pour nous (boussoles, dynamos, etc.) mais aussi pour la Terre. En effet, il la protège des particules dangereuses émises en permanence par le Soleil, comme une sorte de bouclier naturel. Cet affrontement se transforme en un magnifique spectacle de lumières aux pôles Nord et Sud appelé aurores boréales et australes. Comme vous pouvez l'imaginer, ce champ magnétique est ex-

trêmement important. C'est pourquoi une discipline entière lui est consacrée : on l'appelle le géomagnétisme.

Vendredi 20 juin, nous avons eu la chance de rencontrer Pierdavide Coisson, physicien adjoint à l'observatoire de Chambon-la-Forêt. Cet observatoire, qui dépend de l'IPGP, est installé au cœur d'une forêt, à plus de 20 kilomètres de la voie ferrée la plus proche. Cette situation isolée permet d'éviter toute pollution électromagnétique, ce qui est essentiel pour obtenir des mesures précises du champ magnétique terrestre. Pierdavide Coisson nous a expliqué comment les scientifiques y observent en continu les variations du champ magnétique : grâce à des cap-



Le saviez-vous ?

Le champ magnétique de la Terre s'est déjà inversé des centaines de fois. Le pôle nord devient le pôle sud, et vice versa. La dernière inversion complète a eu lieu il y a environ 780 000 ans.

Photographie du laboratoire d'archéomagnétisme. La machine au centre est un inductomètre à rotation qui permet de déterminer la direction et l'intensité de l'aimantation contenue dans l'échantillon. © IPGP



teurs très sensibles, ils peuvent détecter les plus infimes changements liés aux mouvements du noyau terrestre ou à l'activité solaire. Mais surtout, il nous a montré en quoi ces recherches sont utiles : elles permettent de mieux comprendre le fonctionnement interne de la Terre, de suivre les tempêtes magnétiques pouvant perturber satellites et réseaux électriques, et même de cartographier le champ magnétique pour la navigation. Bref, un travail de l'ombre... au service de notre sécurité et de la science.

Enfin, au cours de notre deuxième semaine de stage, nous avons passé une matinée en immersion totale avec l'équipe PAMCE. Cette équipe comprend une branche spécialisée dans l'étude du paléomagnétisme, qui cherche à reconstituer l'histoire du champ magnétique terrestre à travers le temps. En effet, certaines roches et objets cuits, comme les poteries ou les laves volcaniques, gardent en mémoire l'orientation et l'intensité du champ magné-

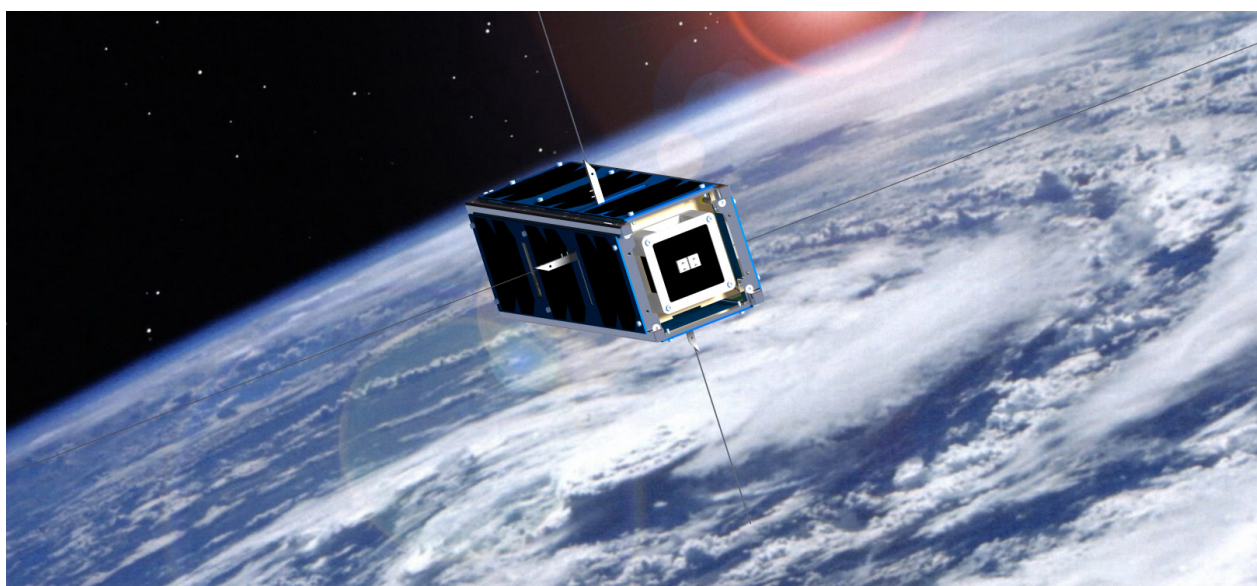
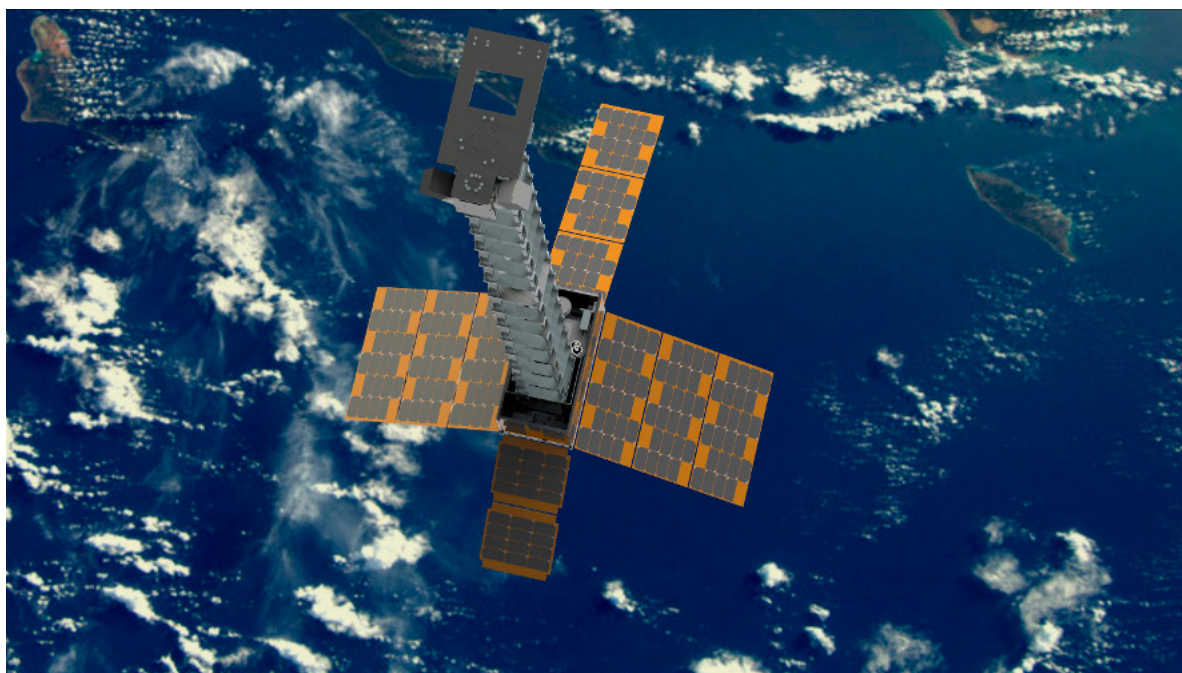
tique au moment où ils ont refroidi. Cela permet aux scientifiques de retracer les déplacements ou les inversions du champ dans le passé. Une autre discipline, appelée archéomagnétisme, utilise ce principe pour dater des objets archéologiques en comparant leur « empreinte magnétique » aux variations connues du champ terrestre à différentes époques. Lors de cette matinée, nous avons également eu la chance de visiter une salle très particulière : une pièce entièrement isolée du champ magnétique terrestre. Grâce à une cage spéciale, les chercheurs peuvent y effectuer des mesures ultra-précises sans aucune interférence. C'est dans cet environnement « sans champ » qu'ils analysent des échantillons anciens pour en tirer des informations précieuses sur le passé magnétique de la Terre.

François Langendorff

¹ Un appareil qui produit de l'électricité en faisant tourner un conducteur dans un champ magnétique, transformant ainsi l'énergie mécanique en énergie électrique.



*Vue d'artiste d'un des 3 nanosatellites de la mission NanoMagSat destinée à étudier le champs magnétique terrestre.
© Open Cosmos & NanoMagSat consortium*



*IGOSat, un satellite étudiant destiné à étudier l'ionosphère terrestre, et pour lequel Pierdavid Coisson est également investi.
© IGOSat*

Qu'est-ce que la Terre nous raconte à travers ses roches, ses minéraux ou ses océans ? Pour le savoir, il faut interroger la chimie de notre planète. C'est là qu'intervient la géochimie, une discipline à la croisée de la géologie, de la chimie et de la physique, qui étudie la composition des matériaux et les processus qui les transforment depuis la formation de la Terre jusqu'à aujourd'hui. Nous vous proposons de découvrir trois grands volets de la géochimie. La géochimie des isotopes stables, puis la minéralogie et enfin la géochimie des enveloppes externes.



GÉOCHIMIE



Géochimie des isotopes stables

L'équipe de géochimie des isotopes¹ stables, est une des 16 équipes de recherche. Son but est de faire le lien entre différents matériaux. Ils interviennent dans de nombreux domaines et permettent notamment de retracer l'apparition de la vie sur Terre.



Le saviez-vous ?

Pour pouvoir faire fonctionner les spectromètres de masse, les scientifiques utilisent des pompes pour simuler le vide. Il existe plusieurs types de pompes : les primaires, les secondaires, les turbomoléculaires et les ioniques, pouvant faire baisser la pression jusqu'à respectivement 10^{-3} mbar, 10^{-6} mbar, 10^{-9} et 10^{-10} mbar.



Présentation d'un spectromètre de masse © L'effet Palmier

Lors de notre visite de l'équipe de géochimie des isotopes stables nous avons rencontré deux personnes. Le premier est Romaric Tchibinda, ingénieur général depuis 2018, en charge d'aider les enseignants-chercheurs dans leurs recherches. Il fait des lignes et prépare les échantillons pour les chercheurs. Pour cela, Romaric utilise plusieurs instruments, comme les lignes², les spectromètres de masse³ et des pompes pour réduire la pression atmosphérique.

Le deuxième, Pierre Agrinier, est un enseignant-chercheur présent à l'IPGP depuis presque quarante ans. Il a soutenu sa thèse en 1987, et a ensuite été directeur de thèse,

rapporteur de thèse, président de jury et examinateur pour deux thèses.

Que font-ils ?

Ils travaillent sur des domaines variés mais en suivant toujours le même fil conducteur : l'arrivée de la vie sur Terre. Pour cela, les membres de cette équipe « comptent », pour la plupart, le nombre d'éléments chimiques dans un échantillon pour déterminer de potentielles similitudes avec d'autres échantillons. Tout d'abord, ils sélectionnent leurs échantillons, puis les font passer dans des lignes, ces dernières permettent d'isoler l'élément chimique pour pouvoir l'étudier. Ensuite, ils mettent l'élément dans un spectromètre de masse, qui se chargera d'isoler complètement l'élément afin de déterminer la quantité de cet élément chimique dans l'échantillon.

¹ Les isotopes d'un atome sont des atomes avec le même nombre de protons et d'électrons mais seulement, leur nombre de masse diffère.

² Une ligne est un ensemble souvent en verre permettant d'isoler le matériau que l'on veut étudier.

³ Un spectromètre de masse est un appareil qui permet d'identifier et de quantifier les molécules en mesurant la masse de leurs ions.



Photographie d'un morceau de ligne de quartz © L'effet Palmier

Assil Abdessadok & Emmanuel Ilic



Minéralogie



Échantillon de Diopside de la collection de Minéraux de Sorbonne Université © L'effet Palmier



Échantillon de Staurolite de la collection de Minéraux de Sorbonne Université © L'effet Palmier



Échantillon de Rhodochrosite de la collection de Minéraux de Sorbonne Université © L'effet Palmier



Échantillon de Zoisite de la collection de Minéraux de Sorbonne Université © L'effet Palmier

Le saviez-vous ?

Il existe environ 6000 espèces de minéraux différents, de toutes les couleurs et toutes les formes. Il y en a donc pour tous les goûts !

Les minéraux se forment naturellement à partir de composés chimiques qui se solidifient dans des conditions particulières. Certains apparaissent quand de l'eau riche en particules s'écoule lentement, créant des stalactites ou stalagmites. D'autres se forment en profondeur, sous l'effet de la pression et de la chaleur de la Terre, dans le magma par refroidissement. Parfois, des bulles de gaz emprisonnées donnent naissance à des géodes, sortes de cavités tapissées de cristaux brillants faits de silicates et d'autres éléments. Chaque minéral est unique par sa composition chimique et sa structure interne.

Isabelle Martinez, professeure à l'université et directrice adjointe des formations à l'IPGP, explique que l'état cristallin est une forme très courante de l'état solide dans la nature. Un bon exemple est le sel de table, chlorure de sodium (NaCl), qui forme un solide ionique cristallin. Cela signifie que ses atomes sont organisés de manière régulière et répétée dans l'espace. Ce type d'organisa-

tion est aussi ce qu'on retrouve dans les minéraux, qui sont des substances naturelles composées d'une formule chimique précise et d'un agencement ordonné d'atomes. Cette structure explique leurs formes géométriques parfois spectaculaires.

Les différents minéraux sont répartis dans huit catégories différentes par rapport à leurs compositions :

Les éléments natifs

Or (Au), cuivre (Cu), argent (Ag), diamant (C), etc.

Les sulfures (S_2^{2-} , S^{2-})

Pyrites (FeS_2), galène, blende (PbS , ZnS)

Les sulfates (SO_4^{2-})

Gypse et anhydrite ($CaSO_4$)

Les phosphates (PO_4^{3-})

Les halogénures

(Cl^- , F^- , Br^- , I^-)
Halite (NaCl)

Les oxydes et hydroxydes (O^{2-} , OH^-)
de fer, magnétite (Fe_3O_4), d'aluminium etc.

Les carbonates (CO_3^{2-})

calcite ($CaCO_3$),
dolomite ($CaMg(CO_3)_2$)

Les silicates (SiO_4^{4-})

Thomas Carré





Créée en 1823, la collection minéralogique de Sorbonne université est une des plus grandes collections de minéraux de France, avec près de 16 500 échantillons dont 1500 spécimens exposés et environ 1000 espèces différentes.

RHODONITE

(Mn,Ca,Fe,Mg)SiO₃

Géochimie des enveloppes externes

L'équipe Géochimie des enveloppes externes (G2E) de l'IPGP travaille sur les interactions entre les roches, l'eau et la vie. La géochimie signifie la chimie liée à la Terre et les enveloppes externes sont là où on vit, c'est-à-dire les continents, les océans et les rivières. Le jeudi 19 juin, nous avons passé l'après-midi au sein de cette équipe.

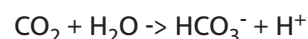
L'altération

Une des problématiques principales sur laquelle travaille l'équipe G2E et la formation du sol. Ceci est dû à l'altération !

Les roches peuvent être altérées¹ par la dissolution du CO₂ dans l'eau, ce qui la rend donc plus acide. Certains composants des roches sont solubles, c'est-à-dire qu'il se dissolvent dans les liquides, et ceux-ci sont emportés par l'eau pendant l'altération. Sans ces éléments la roche change de porosité (la quantité de vide augmente), de densité et de composition chimique et/ou minéralogique.

Il reste donc seulement les éléments inso-

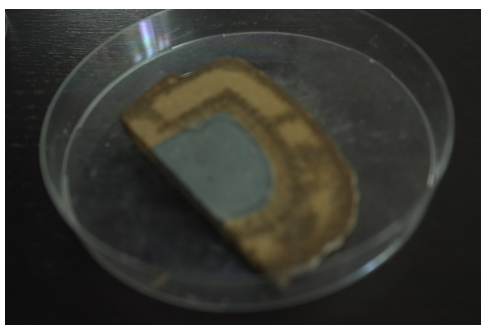
Le dioxyde de carbone (CO₂) dissout dans l'eau (H₂O) produit du bicarbonate (HCO₃⁻) pendant l'altération, qui est soluble.



Les minéraux dans l'eau

Comme dit précédemment, les éléments solubles sont dans l'eau suite à l'altération. Ils sont déplacés par la pluie et se retrouvent dans une rivière. Chacune d'elle possède un bassin versant, c'est-à-dire une zone géographique de collecte de pluie. Les éléments dans cette zone vont donc alimenter la rivière en sels minéraux. Les sels minéraux sont des ions en solution aqueuse. L'eau doit contenir ces sels minéraux pour être potable² :

Analyse en mg/l			
Calcium Ca ²⁺	41	Bicarbonates HCO ₃ ⁻	157
Magnésium Mg ²⁺	3,7	Chlorures Cl ⁻	15
Sodium Na ⁺	17*	Sulfates SO ₄ ²⁻	11
Potassium K ⁺	2,5	Nitrates NO ₃ ⁻	<1
Silice SiO ₂	17	Fluor F ⁻	<0,1
Extrait sec à 180°C / 190 - pH 7,6			



La couche grise est très dense et peu poreuse alors que la couche orange celle qui est altérée est poreuse. © L'effet Palmier

lubles comme Al₂O₃ et le fer. Le fer s'oxyde, ce qui rend la partie altérée orange. Nous pouvons voir ce changement dans les clastes, des roches en cours d'altération qui forment donc un système miniature de celles-ci. L'altération est différente en fonction du climat de l'érosion et du type de roche. La roche s'altérera plus rapidement s'il fait plus chaud et que le sol n'est pas mobile.

L'eau des rivières s'écoule dans d'autres rivières et fleuves de plus en plus grands avant d'arriver dans la mer ou l'océan.

Le bicarbonate (anciennement le CO₂) est ainsi transporté et constitue des squelettes de corail en piégeant le CO₂.

Après avoir récolté des échantillons sur le terrain, les chercheurs les analyse. Ils échantillonnent par exemple de l'eau ou les roches pour mieux comprendre le fonctionnement chimique à la surface terrestre. Dans l'eau,

¹ Les roches altérées sont des roches présentant une modification de la composition chimique et/ou minéralogique.

² L'eau doit donc être en contact avec les roches.



Le saviez-vous ?

Les éléments traces métalliques (ETM) sont présents dans l'eau et dans les sols. Leur concentration moyenne dans la croûte continentale et de 1g par kg. Des exemples sont le cuivre, le plomb, le nickel et le Neodyme.

Ils sont utilisés par les chercheurs pour tracer les minéraux pour savoir d'où viennent les sols et l'eau.



il mesure la quantité d'ions grâce à un outil qui mesure la conductivité, car on sait que plus l'eau conductrice et plus il y a d'ions dissous dedans (Calcium, sodium ou sel...). Ce qui nous montre que cette eau a été en contact avec beaucoup de roches. On mesure aussi le pH de l'eau (acide ou basique) à l'aide d'un papier pH ou d'un pH-mètre. Le fait de connaître l'acidité de l'eau nous permet d'évaluer l'agressivité de l'eau envers les minéraux. Cette mesure est essentielle

pour suivre l'évolution d'un système telle qu'une rivière. Ces chercheurs travaillent aussi dans des laboratoires un peu spéciaux. On les appelle des salles blanches car elles sont complètement stériles et donc, pour y entrer, il faut porter une blouse, des chaussures spécifiques et un masque. Ces salles sont généralement utilisées pour rechercher des minéraux traces, donc les échantillons ne doivent pas être contaminés.



Mesure de l'acidité à l'aide d'un pH-mètre © L'effet Palmier

Arthemus Beaujean & Eva Calvet

ESPACE





L'espace réunit histoire des sciences, cosmochimie, astrophysique, géophysique, planétologie et sciences spatiales. Ce thème explore ces disciplines complémentaires de la formation des astres à l'étude de leur intérieur. Focus sur SEIS et la mission InSight, qui sondent les profondeurs de Mars pour mieux comprendre les mécanismes planétaires. Un voyage au cœur, des savoirs qui façonnent notre vision de l'Univers et de ses mystères.

Histoire des sciences

L'Histoire des sciences est vaste et il faudrait plusieurs centaines de pages pour la raconter et l'expliquer entièrement. Nous avons donc réuni les événements principaux vus à l'IPGP lors de la conférence donnée par Alain Riazuelo, un astrophysicien de l'Institut d'astrophysique de Paris.

James Ussher

James Ussher, un archevêque anglican, théologien et philosophe, publie une chronologie biblique datant la création de la terre à 4004. Av. J.-C.. Cette chronologie est issue d'une lecture littérale de l'ancien testament. Cependant, même si penser que la Terre n'est âgée que de quelques milliers d'années paraît aujourd'hui être une aberration, à l'époque de Ussher, c'était tout à fait censé. Par exemple, Lightfoot, un prêtre anglais trouva un résultat similaire. Il faudra attendre Buffon pour que l'âge de la Terre ne soit revue sérieusement.



Le saviez-vous ?

Buffon savait que la Terre avait plusieurs millions d'années, mais a écrit dans son livre que son estimation était de 74 000 ans pour ne pas s'attirer les foudres du clergé.

Georges-Louis Leclerc Buffon

Vers la fin du XVIII^e siècle, c'est Georges-Louis Leclerc de Buffon, un naturaliste, biologiste, mathématicien et cosmologiste français qui réévalue l'âge de la Terre. Après un travail d'observation rigoureux, Buffon en déduit la chose suivante : la Terre a sans doute été une boule en fusion comme le montre l'existence des volcans cracheurs de lave. Elle a ensuite dû se refroidir pour former une croûte et pour que la vie apparaisse. Suite à ça et à de nombreuses expériences, Buffon déduit que la Terre était en fait âgée de plusieurs milliards d'années, environ 10 minimum selon ses estimations. Il publiera ses travaux dans son encyclopédie « Histoire naturelle » dans laquelle il traitera différents thèmes comme les minéraux, l'histoire de la Terre et quelques animaux, comme par exemple les grands singes. Huit volumes seront publiés après sa mort, dont celui contenant ses recherches sur l'âge réel de la Terre et les points communs entre l'Homme et les singes. Ces travaux et théories ont influencé de nombreux naturalistes comme Charles Darwin et Baptiste Lamarck.

Charles Darwin

En 1859, Charles Darwin expose sa théorie de l'évolution qui place l'Homme comme un

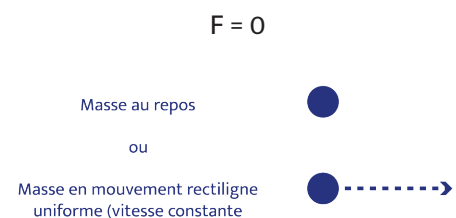
cousin du singe et s'attire donc les foudres de l'Église, mais même de ses collègues chercheurs et du grand public.

Vers la fin du XIX^e siècle, les géologues tentent une nouvelle fois de dater l'âge de la Terre. Darwin utilise les fossiles pour appuyer sa théorie de l'évolution en montrant que c'est un processus long, ce qui témoigne du même coup de l'âge plus qu'avancé de celle-ci. Thomson comme beaucoup refusera la théorie de Darwin, ne voulant pas que le genre humain soit associé aux autres animaux, phénomène allant à l'encontre de la théorie ecclésiastique.

Isaac Newton : 3 lois, une histoire...

1^{ère} loi : l'Inertie

C'est la propriété qu'ont les corps de ne pouvoir d'eux même changer l'état de repos ou de mouvement où ils se trouvent.



2nd loi : la Dynamique

Le principe fondamental de la dynamique désigne une loi de physique mettant en relation la masse d'un objet et l'accélération qu'il reçoit si des forces lui sont appliquées.

$$F = m a$$

3^{ème} loi : les Actions Réciproques



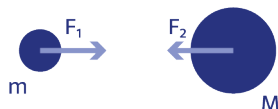


D'après le principe des actions réciproques, tout corps exerçant une force sur un autre corps subit une force d'intensité égale, de même direction mais de sens opposé.

$$F = m g + m a = m (g + a)$$

Une histoire... :

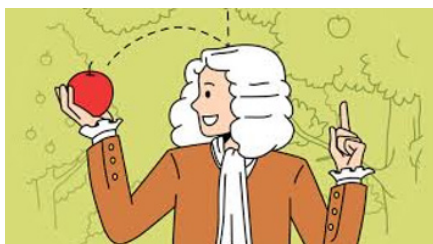
Une légende raconte que Newton aurait



découvert le principe de la gravitation lorsqu'une pomme, tombant d'un arbre sous lequel il était assis, lui serait tombée sur la tête.

Intrigué, il se serait alors interrogé sur la cause de cette chute.

À force de recherches, il en serait arrivé à formuler ce que l'on connaît aujourd'hui sous le nom des trois lois de Newton.



© Freepik

Joseph John Thomson

Joseph John Thomson, né le 18 décembre 1856 et mort le 30 août 1940 est un physicien britannique. Joseph Thomson a découvert l'électron ainsi que les isotopes et a inventé la spectrométrie de masse, il a analysé la programmation des ondes guidées.

(def a mettre dans la marge :

La propagation des ondes guidées : On appelle programmation des ondes guidées la propagation des ondes guidées la propagation d'une onde lorsque celle-ci est contrainte à se propager dans une seule direction, imposé par un guide d'onde.

La spectrométrie de masse : Il s'agit d'une technique d'analyse qui permet la détermination des masses moléculaires des composés analysés ainsi que leur identification et

leur quantification)

Thomson c'est lui aussi intéressé a l'âge que la terre pouvait avoir, il s'est basé sur des techniques telles que la désintégration radioactive, une technique essentielle pour la datation.

(La désintégration radioactive : Tout atome radioactif subit une ou toute une série de désintégrations qui s'enchaînent jusqu'à ce qu'il donne naissance à un atome stable.)

Pierre-Simon de Laplace

Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) était un mathématicien, astronome et physicien français, considéré comme l'un des grands savants de son époque et un pilier de la science classique.

Il a émit la théorie que certaines étoiles de la nébuleuse découvertes a l'aide des télescopes ne font pas partie de la voie lacée et qu'elles sont elles-mêmes des galaxies.

Conclusion

Même si l'histoire des sciences est très vaste, vous avez pu en explorer les moments les plus marquants, à travers de grandes découvertes qui ont changé le cours de l'humanité et transformé notre vision de la Terre, ainsi que la vie des scientifiques qui en sont à l'origine. Mais cette aventure est loin d'être terminée : il nous reste encore énormément de mystères à percer, de questions à résoudre et d'univers à explorer. L'histoire des sciences continue de s'écrire, et peut-être que les découvertes de demain viendront de vous.

Sarah Combettes & Garance Trolet

1 On appelle propagation des ondes guidées, la propagation d'une onde lorsque celle-ci est contrainte à se propager dans une seule direction, imposé par un guide d'onde.

2 La spectroscopie de masse est une technique d'analyse qui permet la détermination des masses moléculaires des composés analysés ainsi que leur identification et leur quantification.

3 La désintégration radioactive signifie que tout atome radioactif subit une ou toute une série de désintégrations qui s'enchaînent jusqu'à ce qu'il donne naissance à un atome stable.



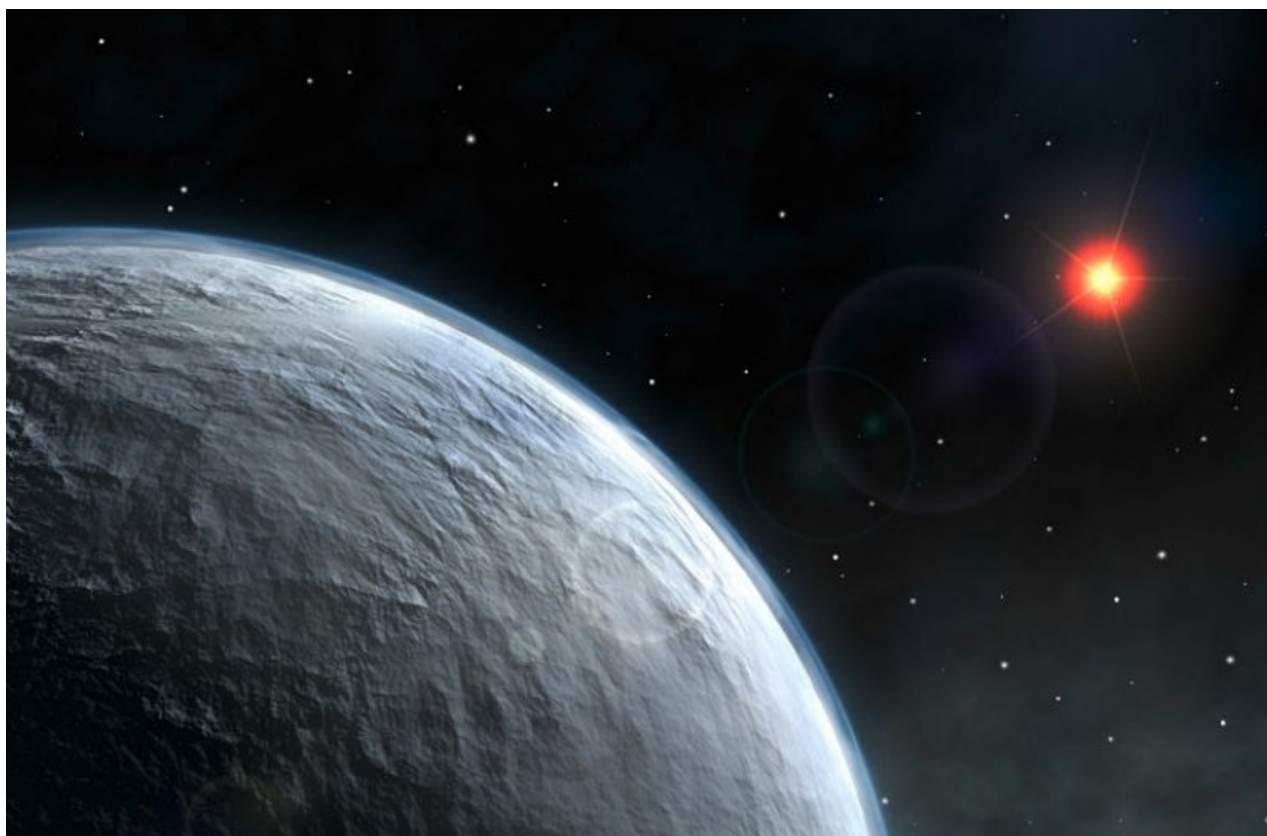
Fun fact

Imaginez un démon qui saurait absolument tout sur le monde à un moment précis : où se trouve chaque chose (chaque grain de sable, chaque planète, chaque molécule) et à quelle vitesse est-ce que tout bouge ?

Avec toutes ces informations et en connaissant les lois de la nature (comme les lois de Newton), ce cerveau pourrait calculer exactement ce qui va se passer dans le futur mais aussi reconstituer le passé.

Comment trouver des exoplanètes ?

Depuis quelques décennies, les astronomes traquent des mondes situés au-delà de notre système solaire : les exoplanètes. Mais comment détecter ces objets invisibles à l'œil nu, souvent noyés dans la lumière de leur étoile ? Cet article explore les méthodes ingénieuses qui permettent de repérer ces planètes lointaines.



Vu d'artiste d'une exoplanète © ESO

Les exoplanètes¹ sont longtemps restées inconnues de l'être humain. En effet, jusqu'au début des années 1990, leur existence n'était prouvée par aucune observation scientifique. Ceci s'explique par le fait qu'elles sont peu lumineuses (elles reflètent seulement la lumière de l'étoile autour de laquelle elles orbitent), et sont extrêmement éloignées de nous, la plus proche de la Terre se situant à environ 4,2 années lumière². Ne pouvant pas les observer directement depuis la Terre, les scientifiques ont dû user de méthodes ingénieuses pour les détecter.

trier les variations de l'intensité lumineuse d'une étoile. Une baisse de celle-ci signale le passage devant l'étoile d'une planète orbitant autour. La méthode par transit permet de connaître la taille de la planète, déterminée par le taux de diminution de l'intensité lumineuse reçue.

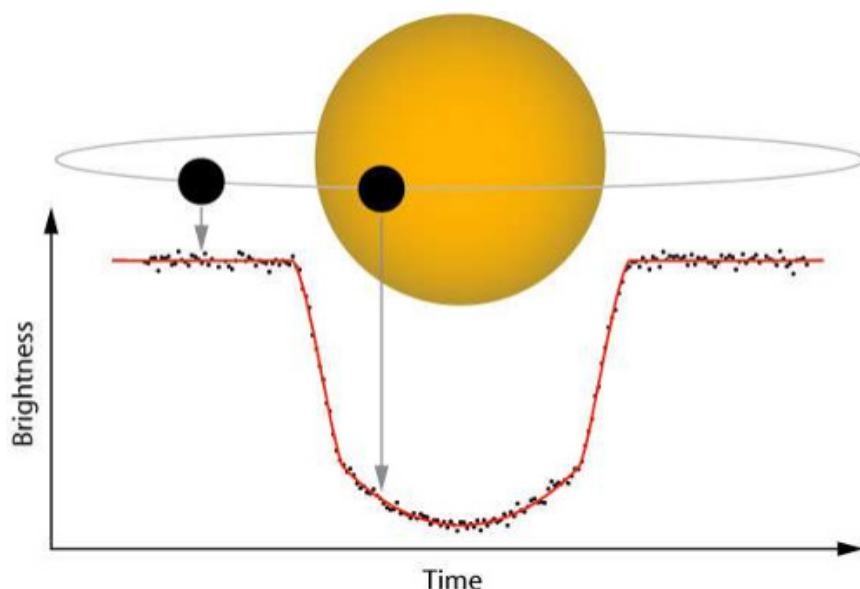
Mais, cette méthode a pour inconvénient qu'elle nécessite l'alignement de la planète avec son étoile et la Terre, ce qui est relativement rare. Les scientifiques passent donc à côté de nombreuses exoplanètes avec cette technique.

La méthode par transit consiste à enregis-

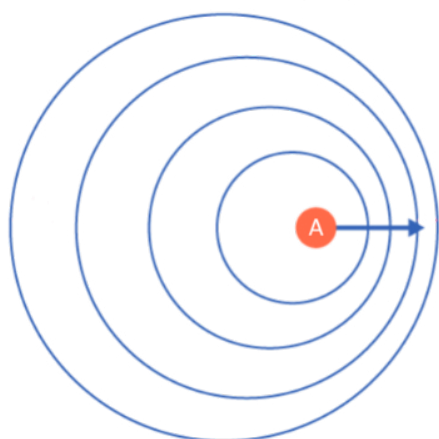
Heureusement, une autre méthode existe

¹ Une exoplanète est une planète orbitant autour d'une étoile autre que le Soleil.

² Une année lumière correspond à la distance parcourue par la lumière en une année (environ 9461 milliards de kilomètres).



Sur le schéma ci-dessus, l'intensité lumineuse de l'étoile reçue par la Terre est à son maximum. Lorsque la planète passe devant, elle absorbe une partie de la lumière émise et l'intensité lumineuse reçue sur Terre est donc plus faible. © César Marques



Lorsque A est en mouvement et émet une certaine longueur d'onde, le récepteur R reçoit une longueur d'onde différente : si l'objet se rapproche, la fréquence est plus élevée et si l'objet s'éloigne, la fréquence est plus basse. Dans le cas de la méthode des vitesses radiales, le spectre lumineux reçu sur Terre se déplace vers le bleu lorsque l'étoile s'approche, et vers le rouge quand elle s'éloigne de nous.

pour ces exoplanètes « oubliées » : l'étude des vitesses radiales.

D'après la 3^{ème} loi de Newton³, la force qu'une étoile exerce sur sa planète équivaut à celle que la planète exerce sur l'étoile, ce qui crée un léger déplacement de celle-ci (le mouvement plus grand de la planète est dû à la masse largement supérieure de l'étoile). Détecter ce mouvement de l'étoile permet donc de détecter une planète orbitant autour. Mais comment percevoir un mouvement aussi faible et d'aussi loin ? Ceci est possible grâce à l'étude du spectre lumineux⁴ de l'étoile reçu sur Terre : sa variation, provoquée par l'effet Doppler indique le mouvement de l'étoile.

Nous pouvons grâce à cette méthode connaître la masse de la planète orbitant autour de l'étoile, indiquée par l'ampleur de la variation du spectre lumineux de l'étoile.

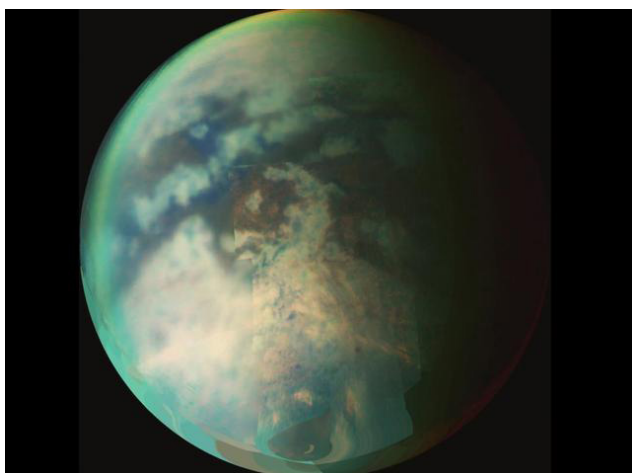
Simon Matteoli & Camille Mercier

³ D'après la troisième loi de Newton, lorsqu'un corps A exerce une force sur un corps B, alors B exerce sur A une force d'égale intensité, de même direction et de sens opposé.

⁴ Le spectre lumineux est l'ensemble des rayons lumineux de différentes longueurs d'onde formant une palette allant de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Planétologie et Sciences spatiales

La vie n'existe-t-elle que sur Terre ? Comment les planètes se forment-elles ? À quoi ressemble leur intérieur ? Ce sont à ces grandes questions que l'équipe de Planétologie et Sciences Spatiales (PSS) tente de répondre, tant sur le papier que sur le terrain.



Photographie de Titan prise par la sonde Cassini-Huygens. © NASA

L'équipe PSS est une équipe majeure de l'institut, qui compte une quarantaine de chercheurs, d'ingénieurs et de doctorants. Ses membres sont issus de disciplines diverses et variées : géophysique, astrophysique, sismologie spatiale, etc. Au quotidien, ce conglomérat de scientifiques crée des modèles, récolte et analyse des données issues des missions spatiales internationales et de leurs observations. Leur laboratoire de recherche est situé dans le bâtiment Lamarck, aux côtés, par exemple, de l'équipe géodésie.

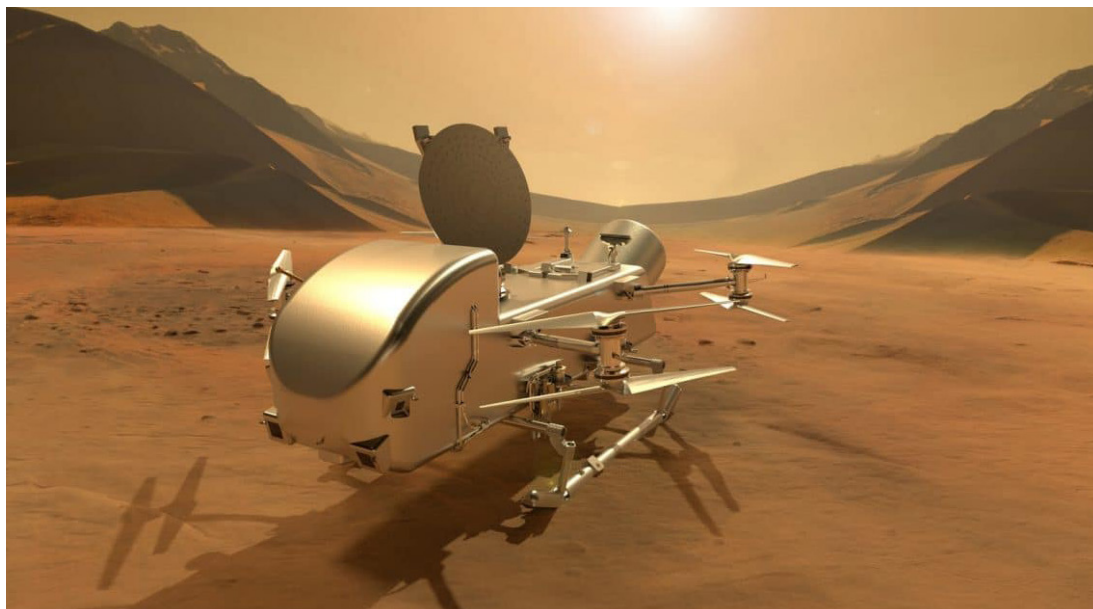
Comme la Terre, plusieurs planètes du système solaire (Jupiter, Saturne, etc.) possèdent également des satellites¹ naturels. Pour les planètes situées dans le système solaire interne, c'est-à-dire à proximité de notre planète bleue, seule Mars possède des satellites naturels : Phobos et Déimos. De par la distance relativement courte qui nous en sépare, nous les connaissons suffisamment bien pour être presque certains qu'il n'y a pas de vie dessus. À l'inverse, certaines lunes du système solaire externe in-

téressent les chercheurs car elles semblent propices à accueillir la vie². Parmi elles, on retrouve Encelade et Titan, deux satellites de Saturne. Encelade est une petite lune recouverte d'une épaisse couche de glace. Ce satellite est particulièrement remarquable à cause de son cryovolcanisme et de ses geysers qui expulsent régulièrement dans l'espace des jets d'eau, de vapeur et de molécules organiques provenant de son océan caché sous la glace. Ce phénomène est une véritable fenêtre sur l'intérieur d'Encelade, donnant aux scientifiques des indices sur ses conditions qui pourraient être favorables à la vie. De plus, Encelade possède un océan souterrain d'eau liquide. Titan, quant à elle, est la plus grande lune de Saturne et possède une atmosphère dense unique, ainsi que des lacs de méthane, un élément qui a son propre cycle, comme celui de l'eau sur Terre. Sous sa croûte glacée, Titan pourrait également abriter un océan d'eau liquide. Grâce à une activité de réalité virtuelle organisée par Antoine Lucas, nous avons pu « visiter » ces deux lunes.

Afin de mieux comprendre le Système solaire et son origine, les membres de l'équipe Planétologie et Sciences Spatiales (PSS) participent, ou ont participé, à plusieurs missions internationales majeures : InSight, Dragonfly, Philae et Farside Seismic Suite (FSS). Grâce à la spécialisation de l'IPGP en géophysique, ces scientifiques sont régulièrement chargés de concevoir des sismomètres, des instruments capables de capter les ondes sismiques générées à la surface d'un astre. L'analyse de ces ondes permet ensuite de modéliser l'intérieur de cet astre, une technique appelée tomographie. C'est ainsi qu'il a été possible de mesurer le rayon

Le saviez-vous ?

Les séismes sur la Lune peuvent durer jusqu'à une heure, alors que ceux sur Terre ne dépassent pas les cinq minutes.



Vue d'artiste de la sonde Dragonfly. © NASA



Le saviez-vous ?

Les jours sur la Terre sont appelés des « sols ». Sur Mars : un jour est égal un sol.



Photographie de l'activité de réalité virtuelle. © L'effet Palmier

¹ La mission Apollo 11 est la 1^{ère} mission sur la Lune emportant des humains en 1969. Le sismomètre alors déposé sur la surface lunaire a duré 3 semaines.

du noyau de Mars grâce aux données de la mission InSight, exercice que nous avons reproduit avec Philippe Lognonné. Mais toutes les missions ne sont pas centrées sur les planètes. Par exemple, la mission FSS prévoit l'envoi d'un sismomètre sur la Lune, sur sa face cachée, à l'horizon 2027. La mission Dragonfly, quant à elle, a pour objectif d'explorer Titan, une lune de Saturne, grâce à un drone autonome de la taille d'une voiture, qui pourra être piloté depuis la Terre pour analyser les propriétés de sa surface et de son atmosphère. Enfin, même lorsque l'intérieur d'un astre est immobile, comme

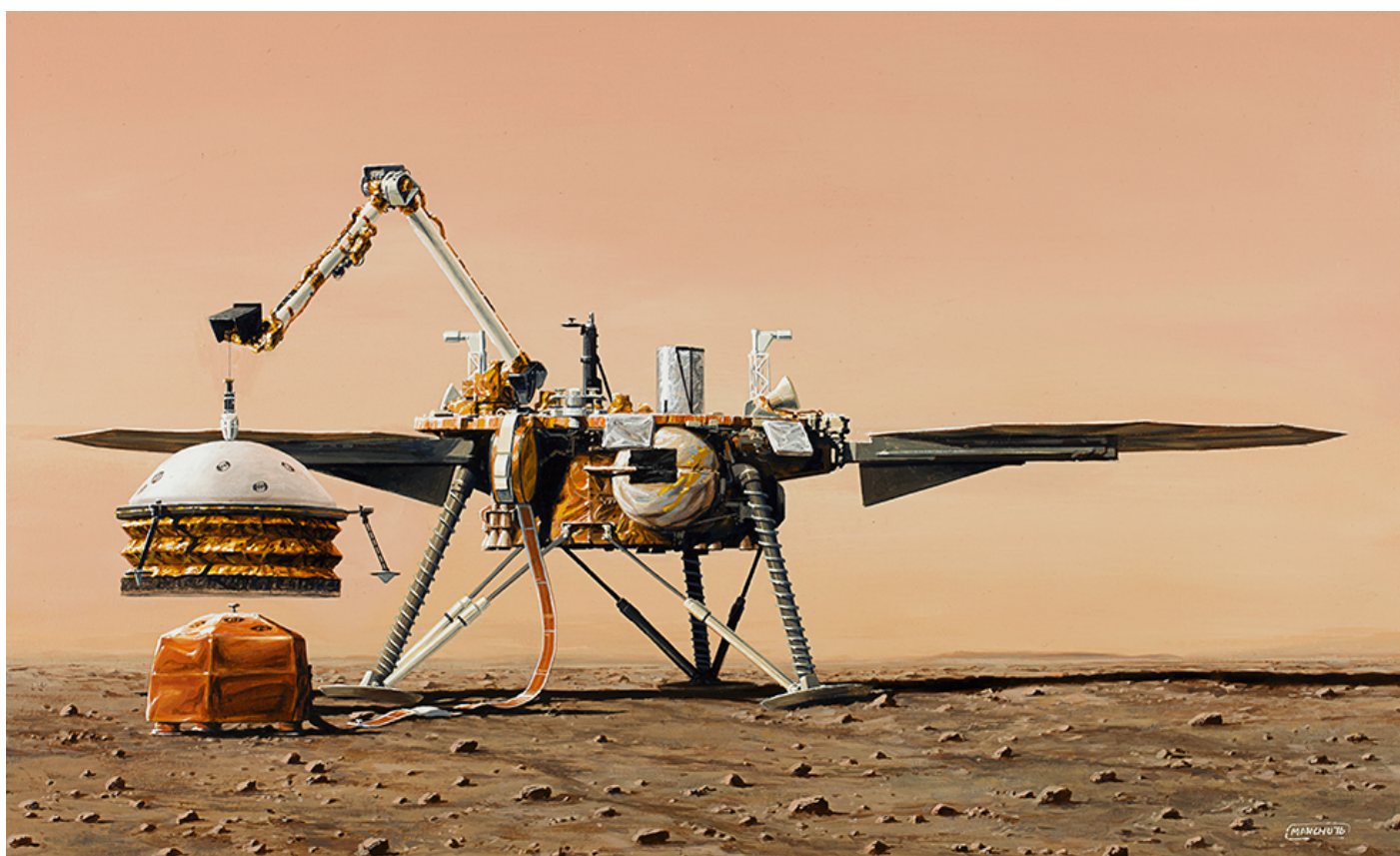
c'est le cas des comètes, il reste possible d'étudier sa structure interne en générant artificiellement une onde sismique : on parle alors de sismologie active. C'est ce qui a été réalisé lors de la mission Philae, qui s'est posée sur la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko.

François Langendorff & Eva Calvet

MISSION INSIGHT

À la découverte de la sismicité sur Mars

Nous connaissons la sismicité terrienne, mais pourquoi se limiter à la Terre ?
Est-ce que des phénomènes semblables se produisent-ils aussi sur la planète Mars ?



InSight dispose d'un bras robotisé pour placer le sismomètre sur le sol afin d'en améliorer l'efficacité. © IPGP / Manchu

¹ Un satellite est un astre gravitant autour d'une planète, le plus connu étant la Lune.

² Une lune est dite propice à la vie si elle a des conditions favorables pour que des êtres vivants puissent exister, comme présenter de l'eau liquide, une température adaptée, et une atmosphère.

L'histoire d'InSight

InSight est le premier observatoire géophysique déployé sur Mars, avec une suite d'instruments comparables à ceux déployer sur la Lune lors de la mission Apollo¹. Cette mission consistait à déployer un sismomètre sur la planète Mars, visant à connaître sa structure interne et sa sismicité. Ce sismomètre nommé SEIS est l'instrument principal de cette mission, qui est également composée de 4 autres éléments dont une protection thermique et un radiomètre (mesure de la température du sol). En 2010, la NASA lance un appel d'offre à tous les scientifiques pour leur proposer une col-

laboration pour un de leurs projets. Parmi les 30 propositions, celle d'InSight a été la dernière retenue et par la suite réalisée.

Comme la Terre et la planète Mars ne tournent pas toutes les deux à la même vitesse, elles sont au plus proche uniquement trois semaines tous les deux ans. La sonde était donc censée décoller en mars 2016, mais à cause de problèmes techniques elle a dû décoller en mai 2018, ce qui a fait gonfler son prix passant de 650 millions de dollars à plus



*Philippe Lognonné, responsable scientifique de l'instrument SEIS (à gauche), et Sébastien de Raucourt, chef de projet du sismomètre à larges bandes (à droite)
© L. Kerjean*

de 800 millions. Le voyage de la sonde a duré environ 6 mois avant d'atterrir, mais le temps de mettre en place le sismomètre a pris 90 jours de plus, dont 80 jours pour trouver le bon endroit où placer le sismomètre SEIS et l'expérience de flux de chaleur HP3, et les 10 derniers jour, le temps de le recouvrir de son bouclier éolien.

Ce sismomètre français, déposé par l'atterrisseur InSight, a fonctionné pendant environ 4 ans, ce qui équivaut à deux années martiennes, et s'est arrêté après 1439 jours martiens. Il s'est arrêté à cause d'amas de poussières martiennes qui se sont déposées sur ces panneaux solaires lui empêchant de produire son énergie. La mission est tout de même une réussite car l'objectif initial était qu'il fonctionne pendant 2 ans, soit 200% de réussite et a permis aux scientifiques d'étudier beaucoup de mesures.

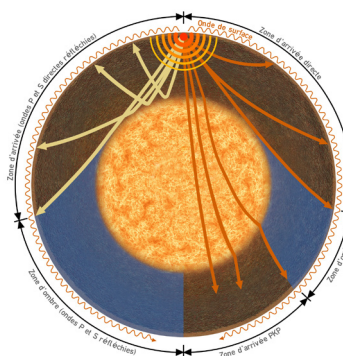
Résultats et interprétation

Les sismomètres ont enregistré 1319 données, comprenant des impacts de météorites et des séismes en dessous d'une magnitude de 4, avec seulement un au-dessus de cette magnitude, enregistrée à 4.7, le plus gros enregistré sur Mars.

Ces séismes ont permis de mieux comprendre la structure interne de Mars no-

tamment la taille de son noyau qui a un rayon de 1830 km.

Ils ont réussi à le déterminer grâce aux deux différentes ondes émises par un



*Schéma de propagation des ondes sismiques à l'intérieur du globe martien
© IPGP/ David Ducros*

séisme, les ondes P et les ondes S. Leur différence est leur vitesse de propagation, ce qui leur a permis d'obtenir ces résultats grâce à la relation entre la vitesse, la distance et le temps.

Bien que la mission soit officiellement terminée, les modèles de recharge des sismomètres sont en train d'être modifiés et vont être réutilisés pour une prochaine mission qui vise cette fois-ci la Lune !

Clara Celanire & Camille Mercier

Les deux semaines de stage étaient super intéressantes. J'ai beaucoup aimé cette opportunité pour découvrir les géosciences et apprendre tellement ! J'ai adoré la diversité des équipes qui m'ont réellement permis de nourrir ma curiosité. Merci à toute l'équipe de l'IPGP pour cette immersion.

Éva Calvet, 16 ans

Ces deux semaines de stage m'ont été très enrichissantes non seulement par l'apprentissage de plein de choses, mais aussi par la création de nouvelles relations. Je remercie fortement les personnes qui nous ont donné de leur temps.

Arwen Caton, 15 ans

J'ai passé de très bonnes semaines durant ce stage, l'ambiance du groupe était très bonne, je remercie tous les chercheurs et ingénieurs qui nous ont présenté leur métier.

Simon Matteoli, 15 ans

Merci pour ce stage, j'ai découvert de nouveaux métiers et disciplines comme les géosciences marines que j'ai particulièrement appréciées. Les chercheurs et autres stagiaires étaient tous très gentils.

Garance Trolet, 15 ans

Ce stage a permis d'éveiller ma curiosité intellectuelle les présentations ainsi que les visites étaient de grande qualité. Merci beaucoup.

Emmanuel Ilic, 15 ans

J'ai bien aimé rencontrer les chercheurs et les ingénieurs pour découvrir leurs travaux. Merci beaucoup à tous les intervenants que nous avons rencontrés, à Audrey et à l'IPGP de nous accueillir durant ces deux semaines scientifiques.

Camille Mercier, 16 ans

J'ai beaucoup aimé ce stage en particulier les visites en salle blanche à Lamarck et la sismologie. En revanche, j'ai moins aimé les présentations.

Assil Abdessadok, 15 ans

Ce stage fut pour moi une expérience exceptionnelle, tant sur le plan scientifique que personnel. Tous les intervenants passionnés et passionnants furent une véritable source d'inspiration, je n'oublierai pas ce stage à l'IPGP de si tôt.

François Langendorff, 15 ans



J'ai passé deux semaines exceptionnelles et appris beaucoup de choses sur les sciences en général, tel que l'usage de sismomètres sur Mars et la Lune ; je le conseille vivement aux prochains secondes. Un excellent stage.

Thomas Carré, 16 ans

C'est la première fois que je passe deux semaines en stage, et franchement on ne s'est pas ennuyés ! On a découvert tellement de thématiques toutes plus intéressantes les unes que les autres. Une bonne expérience que je conseille à tous les prochains secondes. :)

Et merci pour cette opportunité !

Clara Celanire, 15 ans

J'ai beaucoup aimé cette expérience car elle m'a ouverte à des métiers que je ne connaissais même pas. Mon moment préféré a été de voir l'azote liquide se transformer en gaz en le versant.

Léa Costa-Bichler, 15 ans

J'ai apprécié ce stage, surtout les interventions sur la sismologie et la volcanologie. Mes intervenants préférés ont été Nobuaki et Romaric, je n'ai pas apprécié les présentations car c'était trop long.

Rachelle Mkavavo, 15 ans

Durant ce stage, nous avons assisté à pas mal de présentations qui étaient toutes très intéressantes. Néanmoins, j'ai préféré les visites, notamment en microscopie électronique et en salle blanche. Merci à Audrey qui s'est occupé de nous durant les deux semaines, ce qui n'est pas de tout repos.

Arthemus Beaujean, 16 ans

Je garderai un très bon souvenir de mon stage, tant du point de vue des métiers dans le laboratoire, que des connaissances. J'ai appris un grand nombre de choses. Un grand merci à tous ceux qui ont pris de leur temps pour nous présenter leur métier.

Valentin Jaubert, 14 ans

Étant très intéressée par les sciences, ce stage était une bonne expérimentation, j'ai pu apprendre beaucoup de choses, rencontrer beaucoup de personnes incroyables, des chercheurs aux stagiaires. Je garderai un très bon souvenir de ce stage.

Sarah Combettes, 16 ans



Au fait, faites-vous partie de la Team palmier ?



J'aime les sciences ?

- ★ Oui, bien sûr
- Bof...
- Pas du tout

Mon objet préféré

- Une chaise
- Mon téléphone
- ★ Ce magazine

Plus tard, j'aimerais être ...

- Écrivain(e)
- Chercheur(e)
- ★ Botaniste

Tu sauves qui en premier ?

- Le lapin
- ★ La tortue
- Le chat

Je préfère :

- ★ Manger
- Faire du sport
- Lire

Est-ce que vous prendriez un palmier sur Mars ?

- Meh ?...
- ★ Mais oui, quelle bonne idée !
- Certainement pas !



Solution

Vous êtes palmitophobe, mais ayez un peu d'ouverture d'esprit !



Vous ne faites pas (encore) partie de la Team Palmier... Il vous manque encore quelques connaissances en palmiers, et que la force du palmier soit avec vous ! (Abonnez-vous quand même au magazine pour des tips pour palmitos !)

Bravo ! Vous faites partie de la Team Palmier et comme nous, vous amèneriez volontiers un palmier sur Mars quand votre tutrice de stage vous demande dès le premier jour de choisir collectivement 5 objets à amener sur Mars.

Vous avez une majorité de :



Nous tenons à remercier

Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale

Stephan Borensztajn
Sébastien Charnoz
Quentin Dubois-Dauphin

Géochimie des isotopes stables

Pierre Agrinier
Gérard Bardoux
Margot Debruycker
Isabelle Martinez
Romaric Tchibinda

Géochimie des enveloppes externes

Julien Bouchez
Tu-Han Luu
Ivan David Osorio Leon

Géodésie

Julien Barnéoud
Olivier Bock
Xavier Collilieux
Emma Gourrion
Guillaume Lion
Samuel Nahmani
Gwendoline Pajot
Charlotte Spriet

Géomagnétisme

Pierdavide Coisson
Mariane Greff

Géosciences marines

Mathilde Cannat
Nathalie Feuillet
Eric Jacques
Milena Majanovic
Cécile Prigent

Observatoire volcanique et sismologique

Jean-Marie Saurel

Paleomagnétisme, paléoclimat, environnement

Julie Carlut
Louise Dauchy
Frédéric Fluteau
Agnès Genevey
Yohan Guyodo
Antonin Pierron

De l'Institut d'astrophysique de Paris

Alain Riazuelo

Spéciale dédicace à
Audrey Le Reun

Planétologie et sciences spatiales & observatoire InSight/FSS

Jérémy Billant
Gabrielle Chabaud
Lorraine Delaroque
Sébastien de Raucourt
Mélanie Drilleau
Pierre-Yves Froissart
Taichi Kawamura
Philippe Lognonné
Antoine Lucas
Tanguy Nebut
Olivier Robert
Sébastien Rodriguez

S-Capad

Alexandre Fournier
Geneviève Moguilny

Sismologie

Pascal Bernard
Luis-Fabian Bonilla-Hidalgo
Nobuaki Fuji
Jean-Paul Montagner
Martin Vallée

Systèmes volcaniques

Olivier Bernard
Fidel Costa
Kévin Migadel
Marina Rosas-Carbajal

Même à
225
millions
de KM on
capte les
VIBES
de La
Terre

