



HAL
open science

Séismes et volcans : Observer pour comprendre les processus et évaluer les aléas

Anne Le Friant, Jean-Christophe J Komorowski, Martin Vallée, Arnaud Lemarchand, Pascal Bernard

► **To cite this version:**

Anne Le Friant, Jean-Christophe J Komorowski, Martin Vallée, Arnaud Lemarchand, Pascal Bernard. Séismes et volcans : Observer pour comprendre les processus et évaluer les aléas. Géosciences, 2019. hal-03014771

HAL Id: hal-03014771

<https://hal.science/hal-03014771>

Submitted on 19 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Séismes et volcans : Observer pour comprendre les processus et évaluer les aléas

Anne LE FRIANT

Directrice adjointe de l'Institut de Physique du Globe de Paris, en charge des observatoires.

lefriant@ipgp.fr

Jean-Christophe KOMOROWSKI

Directeur scientifique des observatoires volcanologiques et sismologiques, Institut de Physique du Globe de Paris

komorow@ipgp.fr

Martin VALLÉE

Directeur de l'observatoire GEOSCOPE, Institut de Physique du Globe de Paris

vallee@ipgp.fr

Arnaud LEMARCHAND

Directeur opérationnel des observatoires volcanologiques et sismologiques, Institut de Physique du Globe de Paris

arnaudl@ipgp.fr

Pascal BERNARD

Sismologue, Institut de Physique du Globe de Paris

bernard@ipgp.fr

Mots clefs : volcans, séismes, tsunamis, observation, aléas, modélisation

CHAPEAU

Des millions de gens et l'économie de pays tout entiers sont menacés par les risques naturels tels que les éruptions volcaniques (*Photos 1, 2*), les tremblements de terre, les glissements de terrain ou les tsunamis. Des progrès considérables ont été faits pour comprendre leurs causes et leurs conséquences et pour améliorer leur surveillance. En revanche, même si ces progrès ont profité directement à la société, les géologues et géophysiciens ne sont pas encore en mesure de prédire précisément le moment, le lieu et la magnitude des tremblements de terre comme ils ne peuvent pas anticiper le déclenchement, l'intensité ou la durée d'une éruption. Après les séismes géants de 2004 en Indonésie et de 2011 au Japon et la caractérisation de plusieurs super éruptions (ayant probablement eu des impacts climatiques importants), les grands enjeux en sismologie et en volcanologie sont d'améliorer la connaissance de l'histoire sismique et volcanique de la terre et de comprendre en particulier les processus qui se produisent dans les zones de subduction. 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. La recherche dans ce domaine s'appuie donc massivement sur des réseaux d'observation multiparamètres permanents, semi-permanents ou ponctuels situés dans les régions exposées aux catastrophes. Par exemple, l'IPGP opère des observatoires volcanologiques, sismologiques, magnétiques et des processus d'érosion, à l'échelle de toute la planète. L'IPGP a en particulier la responsabilité de l'observation permanente des trois volcans actifs français d'outremer. Si les réseaux d'observation sont actuellement en plein essor et ont permis de franchir des caps importants en science, il sera indispensable à l'avenir de poursuivre leur développement en s'orientant notamment vers l'instrumentation en forage, l'instrumentation marine et le développement de la modélisation couplée à l'intelligence artificielle. Il est indispensable de développer des recherches sur le système Terre pour aller vers une société de prévention plutôt que de favoriser une société de réparation.

ABSTRACT

Millions of people and the economy of entire countries can be impacted by natural hazards such as volcanic eruptions, earthquakes, landslides or tsunamis. Considerable progress has been made to understand their causes and consequences and to improve their monitoring. However, even though these advances have directly benefited society, geophysicists and geologists are not yet able to accurately predict the timing, location, and magnitude of earthquakes as they cannot predict the onset, intensity, or duration of an eruption. After the giant earthquakes of 2004 in Indonesia and 2011 in Japan and the characterization of several super eruptions (having had climatic impacts), the major stakes in seismology and volcanology are to improve the knowledge of the seismic and volcanic history of the earth and to particular to understand the processes that occur in the subduction zones. In general, natural hazards are the result of large-scale geological processes that evolve over particularly long time intervals. Research in this area therefore relies heavily on permanent, semi-permanent or one-off multiparameter observation networks located in disaster-prone regions. For example, the IGP operates volcano, seismological, magnetic observatories and erosion processes, all over the planet and is officially responsible for the permanent observation of the three active volcanoes in France. While the observation networks are currently booming and have made it possible to cross important milestones in science, it is essential to continue their development by focusing in particular on borehole instrumentation, marine instrumentation and the development of modelling coupled with machine learning. It is essential to develop research on the Earth system to impulse a society of prevention rather than foster a society of repair.

LES GRANDS ENJEUX, LES GRANDS DÉFIS

La lithosphère, constituée de la croûte et d'une partie du manteau supérieur, forme l'enveloppe externe rigide de la Terre (*Figure 1*). Elle est formée d'une quinzaine de plaques lithosphériques ou tectoniques majeures plus ou moins rigides et de nombreuses plaques plus petites qui sont caractérisées par des mouvements relatifs qui reflètent en surface les mouvements de convection qui affectent le manteau terrestre. Le long de leurs frontières, les plaques peuvent s'écarter et diverger au niveau des rides médio-océaniques, coulisser latéralement l'une par rapport à l'autre le long de failles transformantes, et converger en entrant en collision, passant l'une sous l'autre (c'est la subduction), ou l'une sur l'autre pour former des chaînes de montagnes. C'est au niveau de ces frontières de plaques que se produit une grande partie de l'activité sismique et volcanique de la Terre (la subduction créant des arcs volcaniques) et que se concentre aussi une très large proportion de la population mondiale.

Les séismes

Les zones de subduction sont les endroits sur la terre où se produisent les plus grands séismes. Les séismes géants de Sumatra en 2004 et de Tohoku en 2011, à l'origine de tsunamis dévastateurs, ont amené à une prise de conscience. Un cap important a pu être atteint dans la structuration des systèmes d'alerte aux tsunamis (sous l'égide de l'UNESCO) et dans la compréhension des processus en zone de subduction, *Figure 1*. En effet, durant le séisme de Tohoku, un comportement différencié de la faille sismique a été observé selon la profondeur, *Satriano et al., 2014*. A faible profondeur, et donc au large, la faille a bougé sur plusieurs dizaines de mètres ce qui a été à l'origine du tsunami géant qui a dépassé les dimensionnements prévus. A profondeur plus grande, le glissement a été d'amplitude plus faible mais de plus haute fréquence, ce qui a provoqué des vibrations destructrices sur la côte voisine. Un enjeu essentiel serait d'intégrer dans les modèles prédictifs d'aléas cette problématique plus générale du couplage des plaques dans la subduction, avec des zones sismiques bloquées, menaçantes en termes de secousses et tsunamis potentiels, entourées par des zones qui glissent continûment ou de manière transitoire.

En plus de cette complexité spatiale, l'organisation temporelle de la sismicité reste assez mystérieuse. Le cycle sismique régulier et idéal d'une faille « métronome » n'existe pas, en raison de l'interaction chaotique et imprévisible entre failles voisines et à l'intérieur d'une même faille, interaction qui bouscule sans cesse les processus de chargement d'une faille donnée. Ainsi, à l'échelle de milliers d'années, un séisme géant balaye de temps en temps toute une zone de failles, entre temps sollicitées par d'autres grands séismes. Les géologues ont découvert de tels super-cycles, alternant périodes d'intense activité de tout un réseau de failles, et périodes d'activité ralentie. L'idée intuitive que l'occurrence d'un gros séisme "sécurisera" la zone touchée, est ainsi remise en question, ce qui modifie grandement l'évaluation de l'aléa. Les zones de faille rompues par un grand séisme peuvent être de nouveau activées quelques années ou décennies plus tard par un séisme encore plus intense.

En plus de cette sismicité « naturelle », la sismicité « induite » est de plus en plus fréquente. Cette sismicité est provoquée par les activités humaines, lors de l'injection de fluides dans la croûte terrestre pour l'exploitation du sous-sol. Ceci a augmenté considérablement la sismicité au cœur des États-Unis, région dépourvue d'activité sismique naturelle, jusqu'à provoquer des séismes de magnitude proche de 6, donc destructeurs. Il est maintenant essentiel d'étudier le rôle de la pression et de la migration des fluides dans le déclenchement de ruptures sismiques dans les zones de failles, afin de pouvoir continuer une exploitation raisonnée, qui tout en restant efficace, modère la magnitude des séismes induits.

Les volcans

Les zones de subduction sont aussi le lieu de genèse d'une grande partie du volcanisme sur terre. Les volcans, fascinent autant qu'ils menacent les sociétés. Un sujet majeur en volcanologie aujourd'hui concerne les super éruptions (magnitude $M > 7$) qui ont des probabilités d'occurrence moins élevées que d'autres éruptions, mais qui peuvent avoir un impact très important sur le climat (ex : l'éruption du volcan Samalas en Indonésie en 1257 pourrait être à l'origine du petit âge glaciaire qui a entraîné une famine en Europe, *Vidal et al., 2017*). Malgré tous les travaux récents, nous savons encore peu de choses sur ces super éruptions et notamment sur leurs précurseurs. Des études récentes ont montré que le temps de retour d'éruptions $>M8$ avait été sous-estimé : une éruption tous les 5,2 à 48 ka semble plus réaliste qu'une éruption tous les 45 à 714 ka. Un des grands enjeux pour la communauté scientifique est par conséquent d'améliorer la connaissance de l'histoire éruptive des volcans car on comprend facilement que la découverte d'une nouvelle éruption de $>M7$ change immédiatement les probabilités de retour.

Un autre changement de paradigme récent en volcanologie concerne la dynamique des processus qui semble bien plus rapide que supposée par le passé. Par exemple, les temps de résidence des magmas dans le réservoir magmatique (avant éruption) étaient considérés jusqu'à présent être de l'ordre de quelques dizaines à centaines de milliers d'années. Les données actuelles montrent qu'il s'agit plutôt de quelques dizaines de jours à quelques années. Ces travaux ont cependant leurs limites car ils sont réalisés à posteriori sur les produits des éruptions passées. Un défi dans l'avenir sera donc de trouver des modèles permettant de relier les observables aux variables internes des systèmes volcaniques afin d'améliorer les modèles prédictifs et de quantifier leurs incertitudes.

Enfin, depuis quelques dizaines d'années, les processus de déstabilisation de flanc de volcans ont été identifiés comme inhérents à l'évolution d'un édifice volcanique. Ils peuvent ou non être associés à une éruption et produire des tsunamis en fonction du contexte, comme en témoigne le glissement qui a affecté le volcan Anak Krakatau en décembre 2018. De nombreuses questions sont encore à résoudre concernant les événements déclencheurs et les aléas associés. Un point particulier concerne les processus en cascade dont ils peuvent découler, ou qu'ils peuvent engendrer, processus qui ne sont souvent pas pris en compte. Par exemple, les changements climatiques peuvent modifier l'état de contraintes dans un volcan et déclencher la déstabilisation de son flanc (qui peut lui-même être à l'origine d'un tsunami). De même, les liens entre séismes et volcans et la possibilité que des séismes majeurs (>M7) déclenchent des éruptions volcaniques, ou une réactivation de plusieurs volcans, sur des échelles de temps et d'espace variables sont des questions qui animent aujourd'hui la communauté.

LE DÉVELOPPEMENT DES RÉSEAUX : UN SAUT IMPORTANT CES 10 DERNIÈRES ANNÉES

Contrairement aux tempêtes et aux ouragans, les séismes et les volcans destructeurs sont liés à des processus internes, cachés, se produisant à des profondeurs atteignant plusieurs dizaines de kilomètres. Leur observation fine représente donc un grand défi. Depuis 10 ans, les réseaux ont beaucoup évolué et de grands efforts ont été faits pour installer des dispositifs d'observation de haute qualité et de haute résolution spatio-temporelle. Leur but est de mesurer tous les mouvements du sol, qu'ils soient lents et continus, ou très forts lors de séismes de grande amplitude. Actuellement, les réseaux d'observation de la Terre peuvent être continus ou temporaires et s'étendent à terre, en mer mais aussi dans l'espace (satellites avec des capteurs radar, optique, thermique et de mesure des cendres et des aérosols volcaniques tels que le SO₂, et le CO₂). Même si les volumes de données ont considérablement augmenté, ces dernières sont maintenant transmises plus efficacement et traitées plus rapidement grâce aux progrès de l'informatique, à la structuration des communautés scientifiques qui ont adopté des standards mondiaux et aux méthodologies du « Big data » et du « machine Learning » (intelligence artificielle).

Des réseaux d'observation continus

Les séismes et les volcans résultent de processus géologiques se produisant à grande échelle et sur le temps long. Il est donc indispensable de disposer de réseaux d'observation permettant d'acquérir de longues séries continues de données. Ces réseaux peuvent être globaux, comme le réseau sismologique GEOSCOPE co-géré par l'IPGP et l'EOST (*Figure 2*) dont le but est de contribuer à la couverture mondiale de la terre. L'amélioration des réseaux globaux depuis 20 ans a amené à la détermination rapide et systématique des caractéristiques principales (localisation, magnitude, mécanisme) des séismes de magnitude supérieure à 5. Cette magnitude est indispensable pour permettre une alerte tsunami. La sensibilité des instruments utilisés permet également la détection de nouveaux signaux, comme le montre l'observation récente des perturbations locales instantanées de la gravité, engendrées par les grands séismes (*Vallée et al. 2017*), une observation clef pour concevoir une alerte tsunami plus précoce, *Figure 3*.

Les réseaux globaux doivent ensuite être complétés par des réseaux régionaux pour mesurer ce qui se passe à l'échelle d'un système particulier. Par exemple, le réseau d'observation de Corinthe en Grèce enregistre en continu, depuis l'année 2000, l'activité sismique de la partie ouest du rift de Corinthe. Cette zone en extension très rapide (1,5 cm/an sur 10 km) est une des plus sismiques en euro-méditerranée. En France métropolitaine, le réseau large-bande métropolitain (RLBP), composante du projet d'infrastructure RESIF, permet une meilleure caractérisation des sources sismiques et de la structure lithosphérique à l'échelle de la France. Les DOM ne sont pas oubliés, les observatoires volcanologiques et sismologiques de l'IPGP ont la charge de l'observation permanente des 3 volcans actifs (Soufrière, Montagne Pelée et Piton de la Fournaise). Les observatoires antillais, en collaboration avec le UWI Seismic Research Centre se sont équipés de moyens de communication par satellite pour le transfert des données en temps réel pour améliorer la résilience des réseaux de surveillance face

aux catastrophes naturelles inhérentes aux pays tropicaux. Le réseau du consortium IPGP-SRC (Trinidad et Tobago) est quant à lui au coeur du système d'alerte aux tsunamis de la Caraïbe mis en place sous l'égide de l'UNESCO. Enfin, pour suivre l'activité volcanique soutenue du Piton de la Fournaise à la Réunion (4 éruptions et une intrusion magmatique avortée en 2016-2017), l'observatoire a densifié son réseau et développé un système d'alerte précoce (JERK) qui détecte précisément l'accélération des signaux induits par le gonflement/dégonflement du volcan. Ce système opérationnel depuis 2014 a prédit 100% des éruptions.

Des outils d'observation ponctuels

Parallèlement aux réseaux d'observation continus, les scientifiques développent des réseaux ponctuels afin d'imager les structures et de reconstruire la dynamique de processus naturels cachés et inaccessibles à l'observation directe. Les tomographies géophysiques (sismique, conductivité électrique, magnétotellurique, muons, gravimétrie) sont des méthodes qui permettent d'imager les structures et d'obtenir une caractérisation 3D des circulations de fluides à l'intérieur de systèmes complexes, *Figure 4, Rosas-Carbajal et al., 2017*. Cette structure peut ensuite être reliée aux observations acquises par les réseaux continus afin de simuler des scénarios et d'évaluer leurs implications en termes d'aléas et de risques associés.

Enfin, pour répondre au défi de l'amélioration des connaissances des cycles sismiques et volcaniques, l'acquisition des données s'est étendue et développée en mer avec des campagnes de géophysique multi-méthodes (sismique, imagerie, bathymétrie, magnétométrie, gravimétrie) couplées à des observations in-situ, des prélèvements, des forages profonds et l'installation de capteurs en fond de mer. Ces données fournissent des archives géologiques très anciennes sur les phénomènes telluriques (histoire éruptive, paléo-sismicité, paléo-tsunamis et paléo-glissements de terrain sous-marin) car les sédiments marins protègent et préservent les enregistrements (*Le Friant et al., 2015*), (*Photos 3, 4*). L'analyse de la croissance des coraux est une nouvelle approche qui a permis de dater les variations brutales du niveau de la mer engendrées par les paléo-séismes à l'instar des cercles de croissance des arbres qui donnent quant à eux une information climatique.

DES PISTES POUR LE FUTUR

La communauté scientifique n'est pas encore en mesure de prédire quand, comment et où vont se déclencher le prochain séisme ou la prochaine éruption, mais elle a considérablement progressé dans la compréhension des processus mis en jeu. Il est essentiel de continuer à observer, adapter et développer nos réseaux, en s'orientant vers le développement de l'instrumentation en forage et en mer et en poursuivant nos efforts de modélisation conjointe des données issues de différentes disciplines.

Le développement de l'observation

Le développement de l'instrumentation multiparamètres en forages est primordial car il permet de s'affranchir des perturbations extérieures telles que celles liées aux vibrations de surface produites par l'activité humaine, et des effets environnementaux tels que les variations de température ou de pression. Il est alors possible d'avoir accès à des signaux très faibles, lents ou rapides, qui seraient indétectables en surface. En cas d'éruption volcanique, les sites de forages, implémentés sur les zones plus éloignées du volcan, et donc peu vulnérables, sont aussi extrêmement importants car ils permettent de protéger les instruments qui pourront continuer à enregistrer le signal et donc permettre d'interpréter la progression de l'activité.

En sismologie, des efforts considérables sont engagés dans le développement d'observatoires sous-marins câblés, mais jusqu'à maintenant restreints à quelques zones sismiques, dont celle du séisme japonais de 2011 avec le déploiement de câbles de milliers de km de long (S-NET). Des développements de nouveaux capteurs optiques, permettant de mesurer les vibrations, les températures et les déformations en exploitant la sensibilité de la fibre elle-même, ouvrent de nouvelles perspectives pour utiliser des dizaines de kilomètres de câbles comme des milliers de capteurs optiques. Des techniques similaires permettraient d'exploiter les câbles optiques de télécommunication existants, apportant un maillage inédit pour la surveillance du cœur des océans.

Afin d'améliorer le seuil de détection des perturbations de la gravité engendrées par les grands séismes (qui ont un potentiel d'alerte sismique très précoce), de nouveaux concepts sont aujourd'hui explorés afin de s'affranchir du bruit sismique. Ces recherches instrumentales sont très actives car elles motivent également les physiciens qui doivent faire évoluer leurs instruments pour progresser dans la caractérisation des ondes gravitationnelles.

De nouvelles approches de modélisation des processus

Si l'observation s'est considérablement améliorée, il est important de progresser dans la modélisation des processus. En volcanologie, le point critique sera de modéliser l'évolution des propriétés physiques et mécaniques de la roche qui contrôlent la dynamique de l'éruption. En ce qui concerne la modélisation des formes d'ondes sismiques, les codes de calcul actuels permettent de modéliser de manière réaliste, en 3D, la propagation des ondes aux longues périodes (quelques secondes à l'échelle locale régionale, et une vingtaine de secondes à l'échelle mondiale). Cependant, aux plus hautes fréquences, la connaissance du milieu de propagation est encore insuffisante pour des simulations fiables. Un objectif ambitieux est de développer des modèles thermo-hydro-mécaniques, des failles en sismologie, et des édifices éruptifs en volcanologie. A ce jour, nous manquons de mesures pour caler ces modèles mais nous espérons en avoir d'ici quelques années en accédant à une meilleure connaissance de la structure dans les zones de failles sismiques et dans les réservoirs magmatiques et les systèmes hydrothermaux des volcans.

Afin de répondre aux demandes sociétales et d'avoir une approche globale, il est urgent de faire un effort de modélisation « intégrée » en tenant compte de l'ensemble des mesures réalisées par les diverses disciplines impliquées. Par exemple, à Corinthe, la probabilité d'un séisme de magnitude supérieure à 6 à l'échelle de 30 ans a pu être calculée en utilisant cette combinaison d'approches, mais l'équivalent ne peut toujours pas être fait aux Antilles par manque d'information sur la sismicité passée et sur les zones couplées. Des progrès ont également permis de développer des simulations numériques complexes de la dynamique de phénomènes telluriques tels que les écoulements volcaniques, les retombées de cendres volcaniques, les tsunamis et les glissements de terrain. L'avenir est maintenant de pouvoir modéliser un système volcanique dans sa globalité et son impact sur le système Terre pour évaluer les effets dominos, les couplages et les forçages (Machine learning).

Aujourd'hui, une partie importante de la population dans le monde vit proche de volcans actifs, de failles et de zones côtières et ce chiffre ne va cesser d'augmenter compte tenu des migrations fortement dépendantes des changements globaux. Il y a donc une véritable urgence de recherches concernant le système Terre pour aller vers une société de prévention plutôt qu'une société de réparation, et donc une société résiliente qui pourra offrir des perspectives de développement.

ENCART

Chercher-observer-informer-surveiller-prévenir-alerter : comment les sciences peuvent répondre aux demandes sociétales ?

Intégrer les lacunes de connaissances et les incertitudes dans la gestion du risque est une problématique complexe et difficile à résoudre. Dans les zones volcaniques, l'idée générale « on ne peut rien faire contre le volcan mais on saura quand l'éruption arrivera » est encore largement répandue. Or, pour 50% des éruptions, la phase la plus intense et potentiellement dangereuse a lieu dans les 24h qui suivent le début de l'éruption. La transmission aux autorités des informations intégrant des probabilités et leurs incertitudes ainsi que des scénarios évolutifs est un exercice délicat car les autorités en charge de la protection civile attendent des scientifiques des messages plus affirmatifs et certains. Les changements de comportement à La Soufrière de Guadeloupe et l'activité sismique récente à Mayotte sont deux exemples d'actualité particulièrement intéressants. Les phénomènes sismiques et volcaniques y sont en effet interconnectés et entraînent la nécessité de diffusion de nouvelles informations pour répondre à la demande sociétale, malgré les lacunes de connaissance. Il est nécessaire d'avancer en décrivant et en adaptant les scénarios. Cette notion d'adaptabilité et de progression dans les scénarios pour la transmission de l'information et la prévention est indispensable à prendre en compte.

BIBLIOGRAPHIE

- Le Friant, A., et al., (2015). Submarine record of volcanic island construction and collapse in the Lesser Antilles arc: First scientific drilling of submarine volcanic island landslides by IODP Expedition 340. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 16, 2, 420-442.
- Rosas-Carbajal et al., 2017. Three-dimensional density structure of La Soufrière de Guadeloupe lava dome from simultaneous muon radiographies and gravity data. *Geophysical Research Letters*. 10.1002/2017GL074285.
- Satriano, C. et al. (2014). Structural and thermal control of seismic activity and megathrust rupture dynamics in subduction zones : Lessons from the Mw 9.0, 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 403, 287-298, doi [10.1016/j.epsl.2014.06.037](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.037)
- Vallée, M., et al., Observations and modeling of the elastogravity signals preceding direct seismic waves, *Science*, 358, 1164-1168, 2017.
- Vidal, C. et al., 2016. 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

LEGENDES :

- Photo 1** : Piton de la Fournaise (Réunion) : L'éruption d'Août 2015 © OVPF IPGP. OU Piton de la Fournaise (Réunion) : L'éruption de 2008 © OVPF IPGP N. Villeneuve.
- Photo 2** : L'éruption de Soufrière Hills à Montserrat (1995-Présent) a détruit Plymouth, la capitale de l'île, photo de 2003, © IPGP A. Le Friant.
- Photo 3** : Un forage au large de Montserrat (Expedition IODP 340) pour accéder à l'histoire du complexe volcanique de l'île. © IPGP A. Le Friant
- Photo 4** : Une carotte sédimentaire marine. Les niveaux volcaniques (gris sombre) marquent les différentes éruptions volcaniques enregistrées dans les sédiments marins au large de la Martinique, Forage IODP U1397, (Expedition IODP 340). © IPGP A. Le Friant
- Figure 1** : Représentation schématique de la subduction des Antilles. © IPGP.
OU Représentation schématique de la subduction des Antilles et localisation des différents types de séismes. © IPGP Jean-Bernard De Chabalier.
- Figure 2** : Réseau Geoscope , © IPGP M. Vallée.
- Figure 3** : Les effets des perturbations de gravité enregistrées par le sismomètre avant les ondes sismiques directes (d'après Vallée et al., 2017), © IPGP.
- Figure 4** : Principe du télescope à Muons. Imagerie 3D de la Soufrière de Guadeloupe (Modifiée d'après figure Rosas-Carbajal et al., 2017, @IPGP)

Photo 1



ou



Photo 2



OU



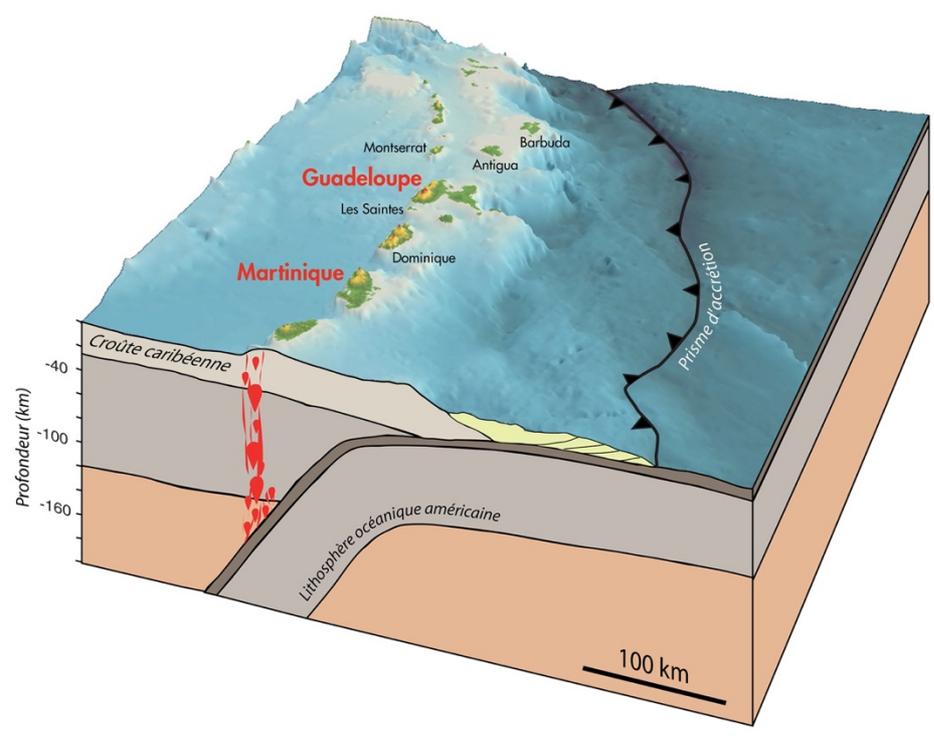
Photo 3



Photo 4



Figure 1



OU

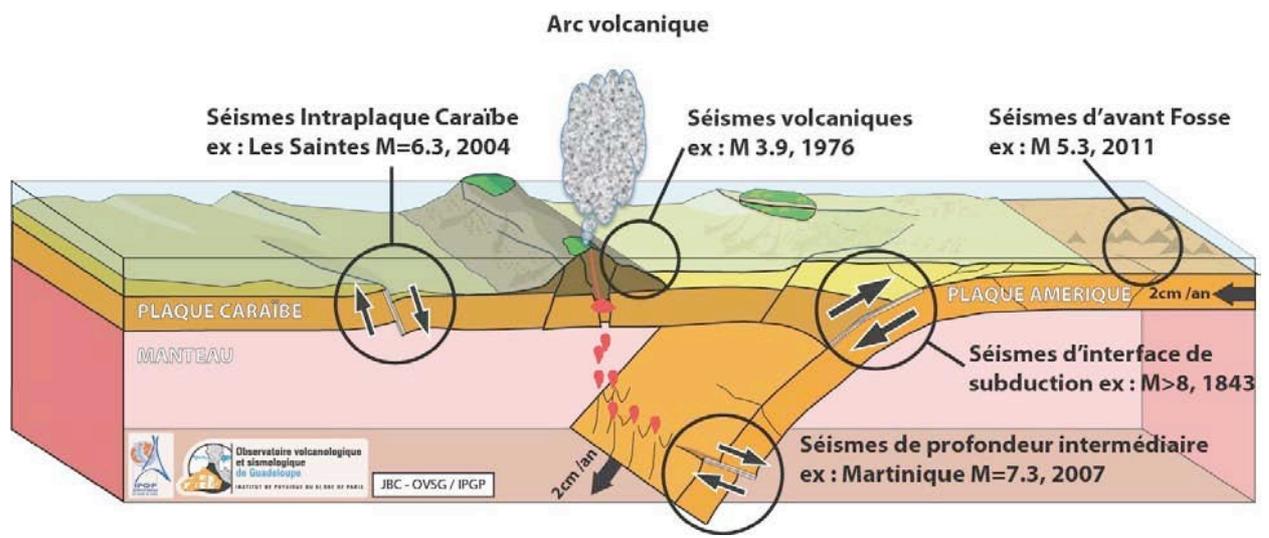
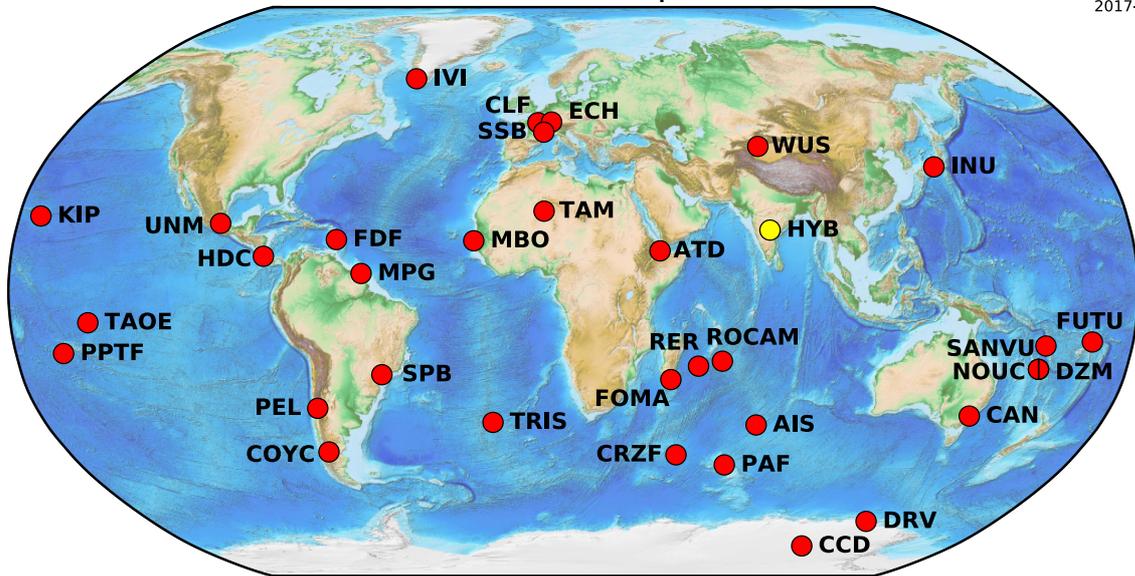


Figure 2

Réseau Geoscope (G)

2017-01-24



● stations en temps réel (ou légèrement différé) ● stations temporairement interrompues

Figure 3

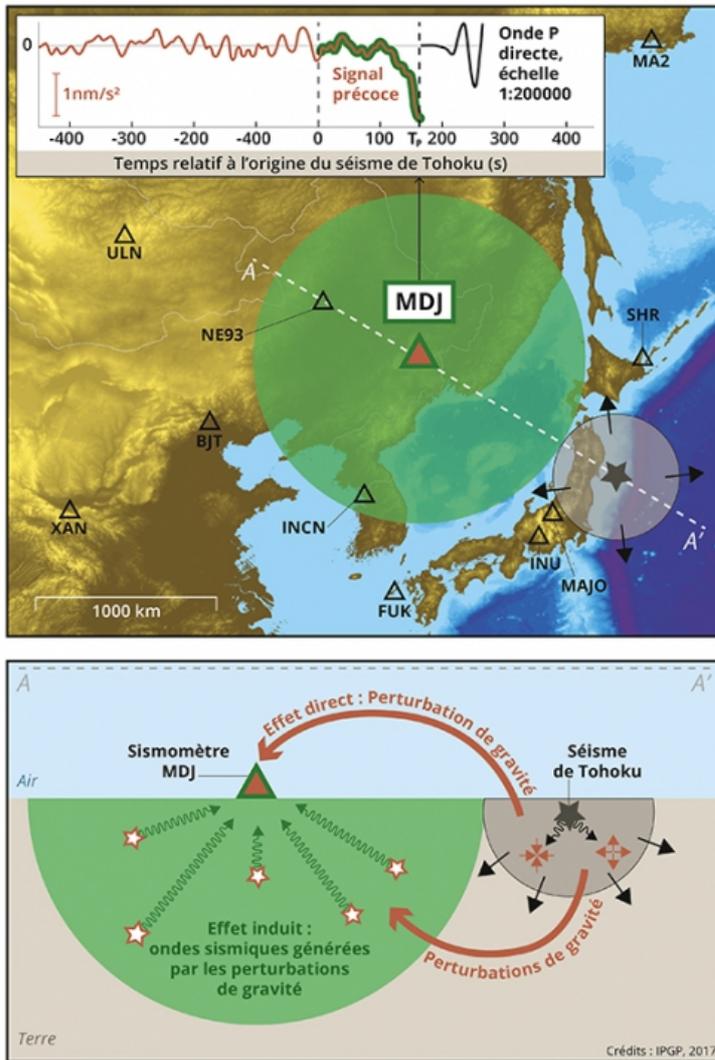


Figure 4

