



# LA LETTRE DE L'ÉOST

N34 FÉVRIER 2020

LETTRE D'INFORMATION  
DE L'ÉCOLE ET OBSERVATOIRE  
DES SCIENCES DE LA TERRE  
[eost.unistra.fr](http://eost.unistra.fr)



École et observatoire

des **sciences de la Terre**

de l'Université de Strasbourg

et du 

## SOMMAIRE

## Création de l'ITI G-eau-TE

## Formation

Le projet Hydrogéolabs	3
Projet de fin d'étude en Slovaquie	5

## Observatoires

Focus sur le BCMT	6
Enquête du GIM au Teil	8
Séismes de Strasbourg	10

## Recherche

Collaboration sur les lacs des zones arides	11
Dégradation naturelle du chlordécone	12
Comportement des volcans avec dômes de lave	13
Intelligence artificielle et géophysique	14
'Oumuamua, astéroïde interstellaire	17

## Grand public

Passage de flambeau au musée de minéralogie	19
Exposition Les bruits du temps II	20

**DIRECTEUR DE LA PUBLICATION** Frédéric Masson

**REALISATION** Véronique Bertrand

**IMPRESSION** Imprimerie DALI / Unistra

**PHOTO DE COUVERTURE** Volcan Merapi (Indonésie).  
Crédits : Thomas Walter (GFZ, Allemagne)

LETTRE D'INFORMATION  
DE L'ÉCOLE ET OBSERVATOIRE  
DES SCIENCES DE LA TERRE

N34 FÉVRIER 2020

## CHÈRES ET CHERS COLLÈGUES,

Dans le cadre de l'IDEX et du renouvellement des Labex, l'Université de Strasbourg, avec ses partenaires le CNRS et l'Inserm, a lancé en janvier 2019 un programme de développement d'Instituts thématiques interdisciplinaires (ITI) recherche-formation. L'enjeu des ITI est de mettre en relation différents acteurs aux compétences disciplinaires complémentaires autour d'une même thématique dans un esprit de transversalité aux structures de recherche et d'enseignement existantes. 18 candidatures ont été déposées et évaluées par un comité d'experts scientifiques internationaux. Onze projets ont été retenus pour une durée de huit ans, quatre ont été retenus avec une période probatoire de quatre ans, deux n'ont pas été labellisés mais feront néanmoins l'objet d'un soutien spécifique de l'Université pendant quatre ans. Les ITI fonctionneront à partir de janvier 2021. L'année 2020 sera une année de mise en place administrative et opérationnelle, après attribution des financements. L'enveloppe prévisionnelle est de l'ordre de 13 M€/an.

L'Eost a proposé deux projets, l'ITI G-eau-TE (Géosciences pour la transition énergétique : valorisation de l'eau profonde du sous-sol) et l'ITI ISY (Institute for sustainability – research, education and transfer for sustainable socio-ecosystems). Ces deux projets ont été présentés dans la lettre de l'EOST n°32.

L'ITI G-eau-TE fait partie des onze projets retenus et financés pour la période maximale de huit ans. Sa très bonne évaluation est une reconnaissance d'efforts menés depuis longtemps dans le cadre du Labex G-eau-thermie-profonde et la validation de choix stratégiques pertinents pour faire évoluer le projet. L'ITI G-eau-TE sera, comme le Labex, une structure transversale qui couvre l'ensemble des thématiques de recherche de l'Eost en impliquant également le laboratoire ICube dans les domaines de l'ingénierie et le Lisec/Crem/Sage pour les sciences sociales. Il nous aidera aussi à faire évoluer nos formations en partenariat avec IFP-Energies Nouvelles (Ifpen). C'est une très belle opportunité pour les prochaines années. Cela conforte la place de l'Eost au sein de l'Université. Vous trouverez dans l'article ci-contre plus de détails sur l'ITI G-eau-TE.

L'ITI ISY n'a pas été retenu. Cependant il fait partie des projets qui feront l'objet d'un soutien spécifique de l'Université pendant quatre ans, car le comité décisionnel a souligné le remarquable effort de structuration mené et la dynamique insufflée sur le terrain novateur des sciences de la durabilité et de la résilience. L'Université a décidé de donner au projet les moyens de poursuivre sa maturation par le biais d'une fédération d'animation de recherche qui bénéficiera d'un soutien financier spécifique destiné à renforcer l'animation et la mobilisation de la communauté dans des projets collaboratifs. La perspective est de soumettre un projet consolidé en vue d'une labellisation en ITI dans quatre ans.

Frédéric Masson, directeur de l'Eost

## CRÉATION À L'EOST D'UN ITI « GÉOSCIENCES POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE »

L'Institut Thématique Interdisciplinaire (ITI) G-eau-TE "Géoscience pour la transition énergétique : valorisation de l'eau profonde du sous-sol" a été sélectionné le mardi 7 janvier 2020 parmi les grands projets lauréats du programme d'Initiative d'Excellence « Dépasser les frontières » co-porté par l'Université de Strasbourg, le CNRS et l'Inserm. Ce programme est à l'origine de la création d'Instituts Thématiques Interdisciplinaires qui ont pour objectif de favoriser les actions de recherche et de formation dans un environnement universitaire interdisciplinaire.

## DU LABEX G-EAU-THERMIE PROFONDE À L'ITI G-EAU-TE : UNE NOUVELLE STRATÉGIE

L'ITI G-eau-TE fait partie des 11 projets labellisés pour 8 ans (2021-2028) par l'Université de Strasbourg. Il s'appuie sur l'expertise scientifique acquise par l'actuel LabEx G-eau-thermie Profonde. Le laboratoire d'excellence détient déjà une expertise européenne autour de la géothermie profonde. Il intervient comme un acteur majeur de la recherche sur les problématiques énergétiques de la Région Grand Est, en lien avec les acteurs industriels et institutionnels. A l'horizon 2021, l'ITI Géoscience pour la transition énergétique élargit le champ d'action du LabEx G-eau-thermie Profonde dans le domaine du rôle de l'eau profonde pour la transition énergétique. Ce nouveau pôle de compétences interdisciplinaire se positionne comme un acteur majeur dans le dialogue science et société. L'initiative est soutenue par l'Eost, et ses laboratoires IPGS, LHyGeS, spécialisés en géosciences. Elle associe également le laboratoire iCUBE, pour sa compétence en recherche et développement en ingénierie ainsi que les laboratoires Lisec, Crem et Sage apportent leur expertise dans le domaine des sciences sociales.

## DES ENJEUX FORTS ET UNE RÉPONSE POSSIBLE FACE À LA CRISE ÉCOLOGIQUE MONDIALE

L'ITI G-Eau-TE est une solution géoscientifique pour répondre aux enjeux posés par la crise mondiale écologique. Il démontre l'engagement de l'Université dans la réflexion autour des nécessaires nouvelles ressources énergétiques. Pour une transi-

tion énergétique, la recherche se réalise sur des ressources bas/neutre carbone et des ressources qui jouent un rôle majeur dans la mise en place de réseaux durables (géothermie, stockage de chaleur, séquestration de carbone, production de lithium, production d'hydrogène). Il a pour objectif d'apporter la connaissance scientifique et répondre aux nombreuses interrogations sociétales liées aux problématiques environnementales. Il se positionne dans un contexte international.

## UN NOUVEAU POSITIONNEMENT AUTOUR DE LA RECHERCHE ET DE LA FORMATION

A travers une approche interdisciplinaire, autour d'une formation internationale exigeante, adossé à une recherche interdisciplinaire de pointe, en prise directe avec les acteurs industriels, partenaires politiques et institutions publiques, l'ITI G-eau-TE organise ses actions sur un sujet innovant : le rôle de l'eau profonde du sous-sol, comme outil clé de la transition énergétique. Plus précisément, l'ITI G-Eau-TE oriente sa formation et sa recherche autour de points spécifiques. Le rôle de l'eau profonde dans le développement d'autres ressources énergétiques du sous-sol comme l'hydrogène, le lithium, le stockage de chaleur ou de CO<sub>2</sub>. Les exploitations couplées de ces ressources multiples associées à l'eau profonde sont ainsi vues comme une géo-ressource minière plurielle. Un autre volet concerne l'étude des impacts environnementaux et sociétaux liés à l'exploitation énergétique du sous-sol en particulier sur les ressources en eau potable et la sismicité induite/déclenchée.

L'ITI G-eau-TE constitue également une opportunité pour les formations en géosciences proposées à l'Eost d'évoluer vers la transition énergétique. L'Eost est la seule école d'ingénieurs géophysiciens en France, elle forme des géophysiciens de haut niveau, principalement pour le secteur de l'énergie.

Avec la réorientation mondiale de ce secteur, l'Eost a la possibilité, grâce à l'ITI G-eau-TE, de devenir un leader dans la formation de la prochaine génération de géoscientifiques spécialisés dans les énergies renouvelables. Pour cela l'Eost s'appuiera notamment sur son expertise en géophy-

sique et proposera un nouveau parcours à l'école, à travers la création d'un Master international co-porté avec l'IFP School intitulé « Geosciences for the Energy Systems Transition ». Dans le cadre de cette initiative de Master ambitieuse et innovante, un accent fort sera mis sur la recherche de pointe et interdisciplinaire. Bien que ce programme soit conçu pour préparer les étudiants à poursuivre en doctorat, l'accent sera également mis sur l'interaction avec l'industrie, afin que les étudiants soient exposés à un large éventail de possibilités de carrières post-universitaires.

## LA RECHERCHE ET L'INDUSTRIE FACE AUX NOUVEAUX DÉFIS MONDIAUX

Les diverses collaborations avec nos partenaires ont permis un travail collaboratif sur les thématiques communes des énergies. Les perspectives internationales de l'ITI G-eau-TE tendent vers un élargissement des compétences et partenariats industriels. Le progrès technoscientifique lié à l'innovation énergétique, le développement des connaissances sur les besoins en nouvelles énergies, sont autant d'enjeux, pour lesquels l'ITI G-eau-TE et ses partenaires ouvrent de nouvelles réflexions.

Valérie Sellani

- Unités de recherche impliquées
  - École et Observatoire des sciences de la Terre (EOST)
  - Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS)
  - Laboratoire d'hydrologie et de géochimie de Strasbourg (LHyGES)
  - Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICube)
  - Laboratoire Interuniversitaire des Sciences de l'Éducation et de la Communication (Lisec)
  - Centre de recherche sur les médiations (CREM, Université de Lorraine)
  - Sociétés, Acteurs, Gouvernement en Europe (Sage)
- École doctorale impliquée : Sciences de la Terre et l'Environnement
- Autres partenaires :
  - Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
  - IFP School (École nationale supérieure du pétrole et des moteurs)
  - NGI (Norwegian Geotechnical Institute)
  - Storengy
  - Total
- Coordination : Jean Schmittbuhl, Patrick Baud, Alexandra Kushnir (Eost)

HydroGeoLABS est l'un des projets lauréat de l'appel d'offre IDEX Formation structuration 2019 de l'Université de Strasbourg, qui bénéficie également d'un co-financement de l'IPGS, du Lhyges et de l'Engées. Ce projet vise à favoriser la manipulation directe des concepts et des techniques dans le domaine des eaux souterraines, que ce soit en termes d'outils (du modèle réduit au modèle numérique) ou en termes d'échelles spatiales (de la maquette de laboratoire à la nappe rhénane). Il a également pour objectif de faciliter le décloisonnement disciplinaire entre les outils hydrogéologiques, géophysiques, biogéochimiques et numériques. Il vise enfin à décloisonner les niveaux de formation en permettant des projets communs entre les différentes formations du site strasbourgeois (Instituts Universitaires de Technologie, Masters et Ecoles d'Ingénieurs) autour de la ressource en eau.

Ces 3 objectifs sont déclinés autour de 4 pôles d'activités : les Labs.

**Le Lab expérimental** va favoriser le développement d'activités pédagogiques sur l'aquifère artificiel de 1000 m<sup>3</sup> de la plateforme Sceres à Cronenbourg pour observer et expérimenter le fonctionnement des aquifères et de leur vulnérabilité, depuis la surface jusqu'à la zone saturée\*. Plus précisément, ce site va permettre :

- la découverte et la manipulation directe des différents capteurs des propriétés bio-géo-physico-chimiques des zones non-saturées et saturées des nappes souterraines ;
- l'appropriation et la mise en œuvre concrète des techniques d'imagerie géophysiques et d'échantillonnage ;
- l'élaboration et la réalisation d'une démarche de diagnostic sur l'évaluation des propriétés réservoirs et la vulnérabilité des eaux souterraines.

\* La zone saturée correspond à la partie de l'aquifère pour laquelle tous les pores du matériel géologique sont saturés en eau.

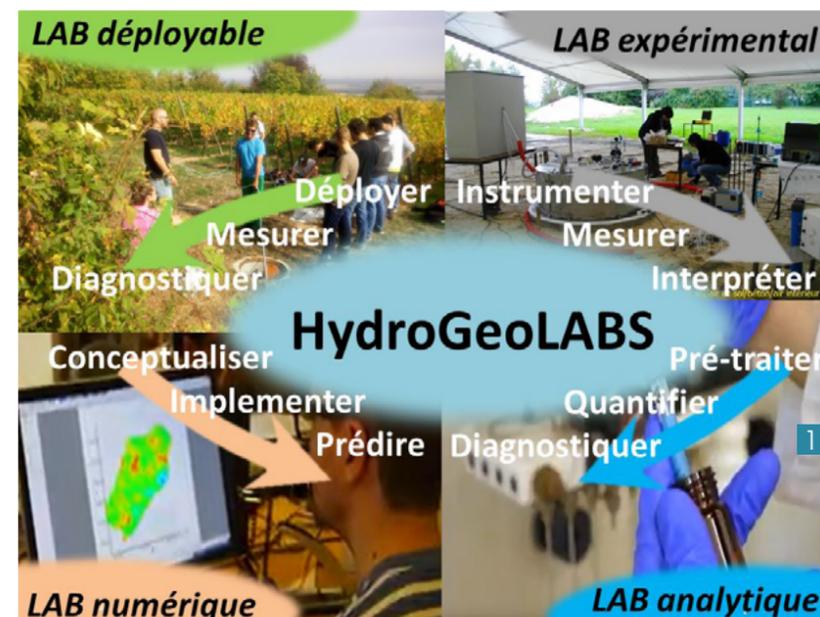
Ces activités sont complémentaires en termes d'échelles d'observation des autres dispositifs déjà mobilisés (dispositifs de laboratoire en 1 et 2 dimensions ou dans les forages, sur le site expérimental de Rouffach, financés par le Pacte ingénieur 2015-2017).

**Le Lab de diagnostic** déployable va être proposé aux étudiants pour concevoir et réaliser leur propre campagne d'imagerie et de diagnostic sur des aquifères à enjeux proposés par les acteurs socio-économiques (collectivités, producteurs d'eau potable, PME) dans le cadre de travaux pratiques dans les unités d'enseignement existantes) et de projets (stages courts, projets de recherche et tutorés). Ce Lab est constitué d'un panel instrumental (sondes en forage, appareils de géophysiques et de prélèvement). Il pourra également être déployé sur les bassins versants expérimentaux du Lhyges-IPGS (Rouffach et Strengbach). Ce Lab offre une grande plasticité dans l'évolution des unités d'enseignement et contribue à l'employabilité des étudiants formés sur les techniques et matériels utilisés par les acteurs du domaine.

**Le Lab analytique** va permettre de manipuler et combiner de façon originale, dans les cursus Géosciences et sciences de l'En-

vironnement, les concepts et instruments de caractérisation géochimique avancée (analyse isotopique composé-spécifique) et de quantification des micropolluants émergeant (pesticides, médicaments). Ce Lab va ainsi stimuler l'appropriation de ces techniques et méthodes de diagnostic utilisées dans la pratique professionnelle pour évaluer le devenir de ces substances dans les eaux souterraines. L'acquisition d'une chromatographie liquide couplée à un spectromètre de masse va permettre aux étudiants d'augmenter significativement la diversité des micropolluants quantifiables par rapport aux appareils déjà proposés dans les unités d'enseignement de transport de contaminants. Cela permettra de diversifier les cas d'étude sur lesquels les étudiants pourront apporter une expertise auprès des acteurs socio-économiques dans le cadre des projets de recherche courts (Master 1) ou des projets tutorés (IUT et écoles d'ingénieurs Eost et Engées) possiblement en lien avec le Lab déployable.

Enfin, **le Lab numérique** va être proposé pour construire et modéliser les scénarios de gestion de la ressource en eaux souterraines en rassemblant une offre unique, sur le site strasbourgeois, de logiciels professionnels, de traitements géomatiques, d'imagerie géophysique, de modélisation



## LA PLATEFORME PÉDAGOGIQUE LAURÉATE DE L'APPEL D'OFFRE HYDROGEO LABS, IDEX FORMATION

hydrogéologique et de transport réactif. Avec un total de 60 licences du logiciel Comsol utilisable à G2EI, ce Lab va permettre une déclinaison et une gradation des activités pédagogiques depuis un niveau basique sur des systèmes simplifiés (relative simplicité de l'interface et de représentation des objets environnementaux) jusqu'à un niveau expert sur le transport réactif, l'évolution des propriétés géo-mécaniques ou l'imagerie électromagnétique des aquifères.

Ce projet vise sur deux années universitaires, 2019-2020 et 2020-2021, à mobiliser progressivement ces quatre Labs dans 41 unités d'enseignement identifiées dans les maquettes existantes (Eost, Engées, Masters, IUT) représentant un total de 500 étudiant.e.s par an et impliquant 30 enseignants-chercheurs. Le projet s'appuie sur la dynamique de site inédite autour de la ressource en eau offrant un continuum enseignement-recherche avec :

- la création du pôle d'enseignement et de recherche G2EI pour la rentrée 2021 qui permettra le regroupement géographique à la Manufacture de l'Engées et de l'Eost, reconnues pour la formation des futurs exploitants des géoréservoirs et gestionnaires des ressources en eau, associées et le département Mécanique du laboratoire ICube ;
- la création d'une nouvelle UMR en Géosciences et Environnement regroupant en 2020, rue du Général Zimmer, les compétences scientifiques de l'IPGS et du Lhyges pour la caractérisation des géoréservoirs (imageries, traçage), leur réactivité (biogéochimie), et la modélisation de leur devenir dans un contexte de changement global (climatique, anthropique), pointant déjà un axe thématique majeur sur les ressources en eau.

Sylvain Payraudeau

Le projet est porté par Jean-François Girard (Eost),  
Sylvain Payraudeau (Engées),  
Dominique Trebouët (IUT Louis Pasteur),  
Yannick Hoarau (UFR Physique & Ingénierie)

Figure > [1] Les 3 objectifs sont déclinés autour de 4 pôles d'activités : les Labs. Crédits : S. Payraudeau



## PROJET DE FIN D'ÉTUDES : DIRECTION LA SLOVAQUIE !

Depuis la rentrée, douze étudiants en troisième année de Licence Sciences de la Terre à l'Eost organisent un camp de terrain sur le volcan Štiavnica dans la région de Banská Bystrica en Slovaquie centrale. Ce stage se déroulera du 1er au 7 juin 2020, avec une capacité d'accueil de 20 étudiants. À l'initiative des étudiants et avec le soutien de l'association Gé-P-To, Géosciences pour tous, ce terrain s'inscrit dans la suite des stages du cursus universitaire et de ceux proposés par Gé-P-To.

Le volcan Štiavnica, actif d'il y a 15 à 12,2 Ma, se situe dans l'arc des Carpates. Ce site présente de multiples intérêts : sa réactivation par la tectonique alpine donne accès à la fois aux dépôts volcaniques superficiels, à la chambre magmatique sous-jacente, ainsi qu'à tout un complexe hydrothermal particulièrement développé, qui a notamment été à l'origine de la constitution d'une des premières écoles des mines du monde. Outre l'apprentissage de la gestion de projets, avec tous les aspects organisationnels, de communication et de gestion financière que cela comporte, ce stage permettra aux étudiants d'apprendre et de perfectionner leurs techniques de géologie de terrain. L'étude structurale, pétrographique et géodynamique sera directement en lien avec

les cours de géologie structurale, de pétrologie magmatique et de géologie de l'Europe. D'autre part, l'étude des gisements hydrothermaux apportera une dimension industrielle en lien avec les cours de ressources minérales, notion indispensable pour la gestion d'avenir de nos ressources. Ce stage permettra d'appréhender l'histoire géologique et économique du site, de la formation du stratovolcan à la caldera, au développement du système hydrothermal en passant par l'exploitation des minerais associés. Après deux jours d'excursion, les étudiants travailleront par groupes, d'abord encadrés, puis en autonomie, afin de réaliser une cartographie du stratovolcan. Les étudiants seront encadrés par Francis Chopin et Benoît Petri, enseignants-chercheurs à l'Eost. Afin de financer le projet, outre leurs apports personnels, les étudiants réalisent des demandes de subventions auprès de l'Eost et de ses partenaires industriels, ainsi que diverses actions de récolte de fonds.

Léna Gauthier

Pour en savoir plus et soutenir le projet : <http://ge-p-to.unistra.fr/>

Photo > [2] Les étudiants en L3 de l'Eost à l'origine du projet en Slovaquie. Crédits : Guillaume Brisac.

## LE SERVICE DES OBSERVATOIRES MAGNÉTIQUES, CONTRIBUTION DE L'EOST AU BUREAU CENTRAL DE MAGNÉTISME TERRESTRE (BCMT)

Le service des observatoires magnétiques de l'Eost contribue à l'un des deux services nationaux d'observation en magnétisme du CNRS-Insu : le Bureau Central de Magnétisme Terrestre (BCMT, Service national d'observation Terre solide, Action nationale d'observation n°4, piloté par l'Institut de Physique du Globe de Paris). Le BCMT, fondé par décret en 1921, est chargé d'organiser et de coordonner les observations françaises du champ magnétique terrestre. Sa mission est de fournir des observations géomagnétiques au sol de la plus haute qualité, répondant aux besoins des communautés française et internationale de recherche en géosciences pour le monde académique et industriel.

A l'Eost, le Service des Observatoires Magnétiques gère les observatoires français des Terres Australes et de l'Antarctique, il collabore aussi avec les scientifiques malgaches au maintien de l'observatoire magnétique national de Madagascar. La localisation géographique des observatoires, dans l'Océan Indien ou en Antarctique est stratégique dans l'hémisphère Sud [Figure 3]. D'une part, ils comblent une grande lacune dans le réseau mondial à la surface de la terre. D'autre part, leur répartition en termes de latitude magnétique est remarquable :

- Antananarivo (Madagascar ; TAN) est dans la zone sub-équatoriale ;
- Amsterdam (TAAF, Base Martin de Vivès ; AMS) et Crozet (TAAF, île de la Possession, Base Alfred Faure ; CZT) sont dans la zone sub-aurorales ;
- Kerguelen (TAAF, Base de Port-aux-Français ; PAF) appartient parfois à la zone aurorale (lors d'événements magnétiques intenses l'ovale auroral a tendance à s'étendre et à se déplacer vers les plus basses latitudes) ;
- Dumont d'Urville (Terre Adélie ; DRV) est toujours dans la zone aurorale, c'est l'observatoire magnétique le plus proche du pôle magnétique sud ;
- Dôme C (Haut Plateau Antarctique, Base Concordia ; DMC) est dans la calotte polaire, à l'intérieur de la zone aurorale, très proche du pôle géomagnétique sud.

**Chaque observatoire magnétique suit des protocoles établis de longue date.** L'environnement de chaque observatoire doit être complètement dépourvu de toute perturbation/pollution magnétique anthropique mesurable (chemin de fer, passages

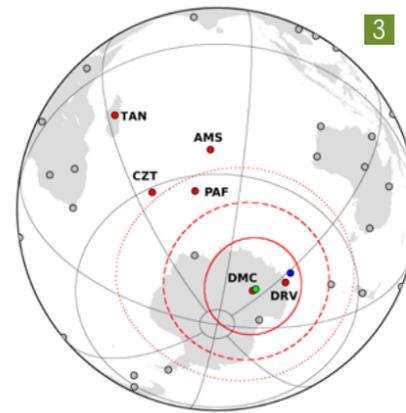
de véhicules, antennes radio émettrices...). Toutes les opérations, ou actions menées, proches des bâtiments des observatoires doivent être réfléchies et référencées afin de maintenir l'hygiène magnétique.

**Chaque observatoire magnétique comporte les mêmes infrastructures, chaînes instrumentales et protocoles d'observation.**

Un premier abri (appelé "calme" ou "vario") renferme deux instruments : un variomètre (magnétomètre fluxgate triaxial), qui mesure les variations naturelles du champ géomagnétique à la fréquence de 1 Hz dans les trois directions de l'espace, et un magnétomètre scalaire qui mesure l'intensité du champ.

Un second abri (appelé "bruyant" ou "mes-abs") permet à un opérateur humain d'effectuer quotidiennement des mesures manuelles d'étalonnage du vecteur champ magnétique (inclinaison et déclinaison). L'observateur utilise pour ces mesures absolues, un théodolite amagnétique, sur lequel est monté une sonde fluxgate axiale, associée à un second magnétomètre scalaire. La réalisation quotidienne des mesures absolues du champ magnétique par les observatoires est nécessaire pour obtenir des données de haute qualité. En effet, tous les magnétomètres vectoriels dérivent inévitablement dans le temps (sur quelques semaines seulement). Actuellement, aucun instrument unique n'est capable de fournir des mesures en vraies grandeurs du vecteur champ magnétique terrestre. Les données de variations, régulièrement étalonnées par des mesures manuelles, constituent l'unique moyen d'obtenir des mesures de la précision requise au nano-Tesla (1 nT = 10<sup>-9</sup> T. Par comparaison, 100 micro-Tesla = 10<sup>-6</sup> T est la limite réglementaire que les réseaux électriques à haute tension doivent respecter dans tous les lieux accessibles en France, soit 1000 fois plus que la précision des mesures d'observatoires).

Dans les observatoires magnétiques des Terres Australes et en Antarctique, les observateurs sont des volontaires au service civique, électroniciens ou informaticiens. Chaque année, à la station géophysique du Welschbruch dans les Vosges, l'équipe des



observatoires magnétiques de l'Eost forme un nouveau contingent d'observateurs pendant six semaines entre septembre et novembre.

**Les données** collectées dans les observatoires magnétiques sont envoyées en premier lieu à l'Eost, où elles sont traitées avant d'être transmises au BCMT, puis par ricochet aux centres internationaux de données en géomagnétisme (ex. : World Data Center in Geomagnetism Edinburgh, Intermagnet).\*

Les données des observatoires magnétiques à la surface de la Terre sont utilisées aussi bien dans les études de Géophysique qu'en Astrophysique. Même si, depuis plus de 30 ans, les missions satellitaires ont permis des avancées dans notre connaissance des sources du champ géomagnétique, les observatoires sont les seules infrastructures d'observations pérennes fournissant de longues séries de données homogènes, propres à décrire la variation séculaire du champ magnétique interne comme l'activité magnétique externe, sur des durées décennales.

**Ingo Wardinski, Armelle Bernard, Jean-Marc Brendlé, Marcellin Fotzé et Aude Chambodut**

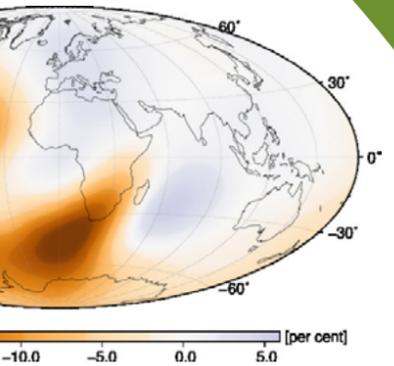
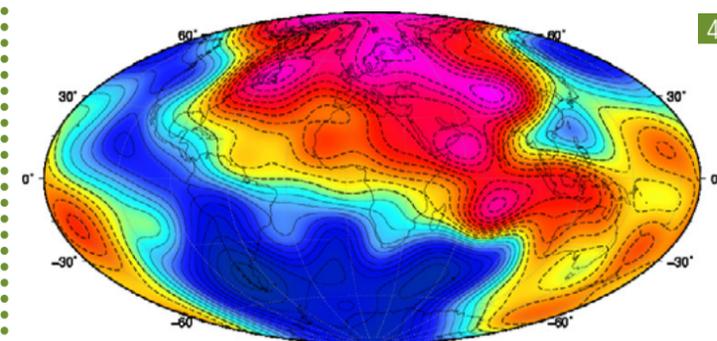
\*Toutes les données définitives du BCMT sont référencées sous un seul DOI de réseau : BCMT Magnetic databank, doi:10.18715/BCMT.MAG.DEF. Elles sont distribuées sous licence internationale Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 (CC BY-NC).

Figure > [3] Positions des observatoires magnétiques de l'EOST (disques rouges) par rapport aux autres observatoires magnétiques (disques gris). Les latitudes géomagnétiques 75° (trait rouge), 65° (tirets rouges) et 55° sont indiquées ainsi que les pôles Sud géomagnétique (disque vert) et magnétique (disque bleu).  
Crédits : A. Chambodut

**Ingo Wardinski** a rejoint en septembre 2019, en tant que Physicien Adjoint, l'équipe des observatoires magnétiques de l'Eost. Il va petit à petit en prendre la responsabilité après une période de biseau avec Aude Chambodut.

Ingo a d'abord travaillé au Centre de recherche allemand pour les géosciences (GFZ Potsdam) pour développer des modèles de champ géomagnétique. Il a notamment contribué à l'élaboration de plusieurs modèles de référence internationaux (IGRF). Ses travaux ont principalement porté sur la description de la variation temporelle du champ magnétique interne de la Terre, c'est-à-dire la variation séculaire, causée par l'advection du champ magnétique dans le noyau externe liquide [Wardinski et al., 2008. Wardinski et Lesur, 2012]. De ses modèles, Ingo a pu déduire les mouvements du fluide à la surface du noyau externe de la Terre [Figure 4].

Comme l'intensité du champ magnétique terrestre diminue depuis 1957 [Figure 5], Ingo s'est alors posé la question de savoir si le champ géomagnétique actuel est au stade précoce d'une excursion ou d'une inversion. Dans une étude sur les excursions de Laschamp et de Mono Lake [Brown, et al., 2018], Ingo et ses co-auteurs ont montré qu'aucun de ces épisodes anciens ne présente une évolution du champ similaire au champ géomagnétique actuel. D'après Ingo et ses co-auteurs, le champ magnétique terrestre ne s'inverse (probablement) pas.



A l'Université de Nantes, Ingo s'est ensuite intéressé à d'autres champs magnétiques planétaires. Dériver des modèles du faible champ magnétique interne de la planète Mercure, à partir des rares mesures de la sonde spatiale Messenger, fut particulièrement difficile. Les études menées révèlent que Mercure possède un champ magnétique interne stable superposé à des champs magnétiques externes variables dans le temps provenant de sa magnétosphère, induisant eux-mêmes un champ magnétique secondaire [Wardinski et al. 2019]. Leurs variations temporelles corrélées ont permis à Ingo d'estimer la taille du noyau de Mercure à environ 2060 km. Cette valeur fournit une première mesure magnétique alternative aux estimations géodésiques et gravimétriques de la taille du noyau de Mercure 2004 +/- 20 km. Depuis septembre, Ingo est revenu sur Terre et tire parti des données des observatoires magnétiques, notam-

ment ceux dont il aura bientôt la responsabilité. Un nouveau modèle IGRF (13ème génération) a été élaboré en cette fin 2019 (Wardinski et al., 2020). La dérivation de nouveaux modèles de champ géomagnétique permettra à Ingo d'étudier l'état dynamique du noyau externe de la Terre dans un cadre transdisciplinaire au sein du laboratoire de l'IPGS. Que donnent les comparaisons avec les variations de rotation de la Terre et son champ de pesanteur ? Quelle est l'influence magnétique des plus grands courants océaniques dans les observatoires gérés par l'Eost ? A suivre ...

Figures >  
[4] Mouvement du fluide à la surface du noyau externe. Le mouvement vers l'ouest est indiqué en bleu, les écoulements vers l'est en rouge. La vitesse moyenne est de 15 km/an. Crédits : I. Wardinski  
[5] Évolution de l'intensité du champ magnétique terrestre depuis 1957. Les zones brunes montrent un affaiblissement de plus de 10%. Crédits : I. Wardinski

Références :  
Brown et al. 2018, doi : 10.1073/pnas.1722110115.  
Wardinski et al. 2008, doi : 10.1016/j.epsl.2007.12.008.  
Wardinski et Lesur 2012, doi : 10.1111/j.1365-246X.2012.05384.x  
Wardinski et al. 2019, doi : 10.1029/2018JE005835.  
Wardinski, I. D. Saturnino, V. Lesur, A. Chambodut, B. Langlais, H. Amit, E. Thébaud et M. Manda (2020). Models and forecasts of the geomagnetic secular variation for the IGRF 13. En préparation.

## LE GROUPE D'INTERVENTION MACROSISMIQUE ENQUÊTE SUR LE TERRAIN APRÈS LE SÉISME DU TEIL

Toujours bien accueilli par les sinistrés, le GIM est parfois témoin de familles se préparant à quitter leur domicile suite à l'analyse des experts en diagnostique bâtiminaire (Pompiers ou AFPS).

Les intensités les plus fortes atteignent localement VIII à la Rouvière et à Mélas, deux quartiers du Teil les plus proches de la faille. Elles sont de VII sur le reste du Teil et à Viviers. Il s'agit des intensités les plus importantes constatées en métropole depuis le séisme d'Arette en 1967.

Les intensités macrosismiques estimées lors de la mission du GIM, sont l'un des éléments majeurs sur lesquels se base la commission interministérielle pour le classement des communes en catastrophe naturelle, déclenchant alors une prise en charge des dommages par les assurances.

Le GIM analyse les 18 et 19 novembre neuf communes parmi les plus touchées et fournit un rapport pour la commission accélérée qui se réunit le 20 novembre. Elles sont toutes classées en état de catastrophe naturelle ainsi que dix de plus, sur les 15 autres étudiées par le GIM, lors de la commission du 11 décembre. Les autres communes impactées, qui sont en cours d'analyse, seront traitées par les commissions suivantes.

**A. Schlupp, E. Mauffroy, L. Provost, R. Dretzen, E. Bertrand, E. Beck, M. Schaming.**

Pour plus d'information sur le séisme : <http://www.franceseisme.fr/nseisme.php?ldSei=930> et sur les échelles d'intensité : <https://lc.cx/mKCU>

Le 11 novembre 2019 à 10h52, un séisme d'une magnitude MLv 5.2 se produit à proximité de Montélimar, sur la commune du Teil.

Contrairement à la magnitude, qui est calculée à partir des enregistrements sismologiques, l'intensité de la secousse n'est connue en chaque commune que par l'analyse des effets observables sur les personnes, objets et constructions. Pour le séisme du Teil, plus de 2000 personnes ayant ressenti la secousse ont répondu à l'enquête via le formulaire disponible sur le site [www.franceseisme.fr](http://www.franceseisme.fr), permettant une estimation préliminaire et rapide de l'intensité de la secousse.

Le BCSF-Rénass lance dès le 12 novembre une enquête auprès des mairies des communes potentiellement impactées. Compte-tenu des dommages décrits, il active le GIM (Groupe d'intervention macrosismique) pour évaluer précisément les intensités EMS98 des communes proches de l'épicentre, à partir des dommages constatés sur les bâtiments en tenant compte de leur vulnérabilité.

Sept experts (IRSN, ISTERRE/Résif-Rap Cerema, Pacte, IPGS et Eost/BCSF-Rénass) répondent à l'appel. Répartis en équipe de deux ou trois, ils inspectent 24 communes entre le 18 et 22 novembre, aidés par les maires ou les services municipaux et parfois accompagnés par les pompiers, comme pour la commune du Teil. Plusieurs centaines de bâtiments de différentes vulnérabilités sont visités.

Dans la majorité des cas, ce sont les plus anciens qui sont marqués par des fissures, parfois importantes, ouvertes et nombreuses. Certains sont partiellement ou totalement effondrés dans les zones les plus sinistrées comme au Teil et à Viviers. Les dommages sont plus importants, pour des bâtiments comparables, sur certains reliefs (Saint-Thomé) ou zones sédimentaires (Savasse), attestant d'effets de site.

Photos :

> [6] Une maison du Teil avant le séisme du 11 novembre 2019.

Crédits : Google Earth, Street view

> [7] La même maison après le séisme.

Crédits : Antoine Schlupp



### LE BCSF-RÉNASS

Le BCSF-Rénass collecte, analyse et diffuse les informations sur la sismicité française. Il a entre autres missions, l'estimation de la sévérité de la secousse au sol, appelée intensité macrosismique. Réalisée à partir de la statistique des effets observés à l'échelle communale (personne, objet, mobilier et constructions) l'intensité (échelle EMS98 à XII degrés) permet de mieux comprendre la décroissance de la secousse avec la distance, de repérer d'éventuels effets (directivité, amplification locale) et d'améliorer la connaissance du risque sismique. Ces valeurs, associées à la magnitude des événements sont utilisées par l'Etat pour le classement des communes en catastrophe naturelle.

Si les effets collectés auprès des citoyens et des autorités, indispensables à cette estimation, se font principalement par formulaire internet sur le site [www.franceseisme.fr](http://www.franceseisme.fr) pour des séismes de faible magnitude, le BCSF-Rénass pilote également un groupe d'intervention macrosismique (GIM) multi-organismes lors des séismes générant des dommages sensibles à importants sur les bâtiments. Il a pour objectif l'étude statistique des dommages par classe de vulnérabilité des bâtiments. Ces indicateurs sont prépondérants pour les intensités supérieures ou égales à VI.

Dans l'objectif de renouveler aux Antilles son groupe d'experts, le BCSF-Rénass, appuyé par l'Ecole nationale supérieure d'Architecture de Nantes, la Deal de Guadeloupe et l'Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe a réalisé une formation à ces expertises de terrain les 21 et 22 novembre 2019. Dix-neuf stagiaires ont ainsi pu bénéficier de cours magistraux et pratiques leur permettant de s'approprier les procédures de collecte et d'estimation d'intensités du GIM et les protocoles assurant la sécurité des intervenants en zone sismique dégradée.

A ce jour, le GIM a réalisé dix missions post-sismiques depuis 2004, dont deux aux Antilles.

## SÉISMES DE STRASBOURG : L'EOST SUR LE PONT

La Terre a tremblé à Strasbourg. Le 12 novembre dernier à 14h38, un séisme de magnitude MLv 3.0 s'est produit dans le secteur de la Robertsau (quartier situé au nord de Strasbourg). Ressentie par la population de l'Eurométropole (près de 500 témoignages ont été collectés sur le site [www.franceseisme.fr](http://www.franceseisme.fr)), mais sans dégâts associés, cette secousse a depuis largement occupé les sphères médiatiques, politiques et scientifiques. En cause, la possibilité que ce séisme puisse être lié aux opérations menées sur le site de géothermie profonde Geoven, exploité par la société Fonroche-Géothermie sur la commune de Vendenheim, à quelques kilomètres au nord de la Robertsau. S'ajoute à cela la coïncidence, à un jour près, avec le séisme du Teil dans le sud de la France (voir article page précédente) où un lien avec une activité anthropique a également été proposé.

Depuis le début des phases de forage et de stimulation au printemps 2018 sur le site de Geoven, le BCSF-Rénass a enregistré plus d'une centaine de microséismes à proximité de ce site [Figure 8], dont une quinzaine ayant dépassé la magnitude de 1.5. La survenue de séismes dits « induits » de faible magnitude et dans l'environnement proche des forages est habituelle, notamment lors des phases de stimulation hydraulique d'un réservoir géothermique. Ce type de sismicité a par exemple été observé et étudié, en particulier dans le cadre du Labex G-Eau-Thermie profonde, sur le site pilote de Soultz-sous-Forêts et plus récemment sur le site industriel de Rittershoffen.

Mais, dès le 8 novembre 2019 (et semble-t-il même avant), un essaim sismique s'est développé à 4km au Sud du site de Vendenheim. L'activité de cet essaim s'est accrue le matin du 12 novembre avec une quinzaine de séismes enregistrés par le BCSF-Rénass avant l'événement de 14h38.

Lors de la première analyse préliminaire, effectuée quelques minutes après son occurrence, le BCSF-Rénass a qualifié ce séisme d'« induit » sur la base de sa proximité spatio-temporelle avec ceux enregistrés ces derniers mois, la similarité de profondeur, l'absence de sismicité les années précédentes et l'existence de

failles régionales dans la zone. L'entreprise Fonroche-Géothermie a rapidement indiqué via un communiqué de presse qu'elle rejetait cette hypothèse. Les services de la Dreal ont cependant demandé l'arrêt des opérations d'injection, tel que défini dans un arrêté préfectoral de 2015, dans l'attente d'informations complémentaires sur cette crise particulière. Les équipes de l'Eost (IPGS/UMS830/LabEx G-eau-thermie Profonde) se sont rapidement mobilisées pour analyser le phénomène. Au niveau national, le CNRS-Insu a mis en place dans les jours qui ont suivi un groupe de travail ad-hoc, sur le modèle de celui créé au même moment pour le séisme du Teil.

Après un travail rapide de ce groupe de travail CNRS-Insu qui a confirmé la présomption du caractère induit, une première étude plus approfondie a été réalisée par l'EOST. Elle a fait l'objet d'un rapport d'étape qui a été envoyé à la Dreal le 17 décembre dernier. Cette étude s'appuie sur le catalogue de BCSF-Rénass ainsi que sur une analyse fine des données issues des stations sismologiques permanentes régionales de Résif-RLBP (voir la Lettre de l'Eost n°32) et complétées par les données de stations allemandes et de stations temporaires à bas-coût (RaspberryShake©) installées par l'EOST dans le Nord de l'Eurométropole quelques mois avant l'événement. Une approche par « template matching », visant à extraire dans les enregistrements continus des formes d'ondes similaires à celles des séismes détectés par le BCSF-Rénass, a permis d'identifier plus de 800 nouveaux microséismes depuis Mars 2018. Ceux-ci se produisent à la fois pendant les périodes d'activité dans les forages du site de géothermie profonde, mais également entre ces périodes. Certains de ces séismes ont pu être re-localisés finement de manière relative les uns par rapport aux autres. Cette analyse confirme bien l'existence de deux essaims dont les phases d'activité se chevauchent début novembre, montrant la corrélation temporelle entre la fin de l'activité sur le site de Geoven et le démarrage de l'essaim sud. En outre, l'organisation des séismes dans l'essaim au sud met en évidence des failles conjuguées avec une structure verticale orientée N10°E où se localisent les deux événements ressentis



le 12 novembre. Cette orientation est en accord avec le mécanisme au foyer de ces deux séismes et celle des failles présentes dans les modèles géologiques. Concernant le lien spatial, la survenue de l'essai de sismicité dans cette zone sud, distante de plus de 4km, peut s'expliquer par l'existence d'une zone particulière de plus faible cohésion le long de ces failles qui sont mécaniquement très proches de l'instabilité. La rupture peut dès lors y être déclenchée par de très légères variations de contraintes comme celles induites par les surpressions lors d'injections de fluides dans les puits profonds, même à plusieurs kilomètres.

Ces analyses sont toujours en cours avec notamment la ré-analyse fine des petits événements du catalogue du BCSF-Rénass et l'intégration des données des stations du réseau de surveillance privé opéré par Fonroche-Géothermie qui ont été fournies à l'Eost. Mais pour mieux comprendre la structure de cette zone sud et les processus à l'œuvre, des moyens d'observation supplémentaires devront être déployés.

La prochaine étape sera de fournir un rapport plus complet à la Dreal début février, pour l'aider dans sa prise de décision d'autorisation ou non de reprise des injections sur le site de Geoven. Les travaux de recherche seront par ailleurs poursuivis, en particulier pour mieux caractériser la date de démarrage de l'essai sud et l'identification des mécanismes de déclenchement. En parallèle, des réflexions et des travaux sont menés pour améliorer encore les méthodes de surveillance de la sismicité lors des opérations sur les sites de géothermie profonde afin de maîtriser au mieux les risques sismiques associés.

**J. Vergne, J. Schmittbuhl**

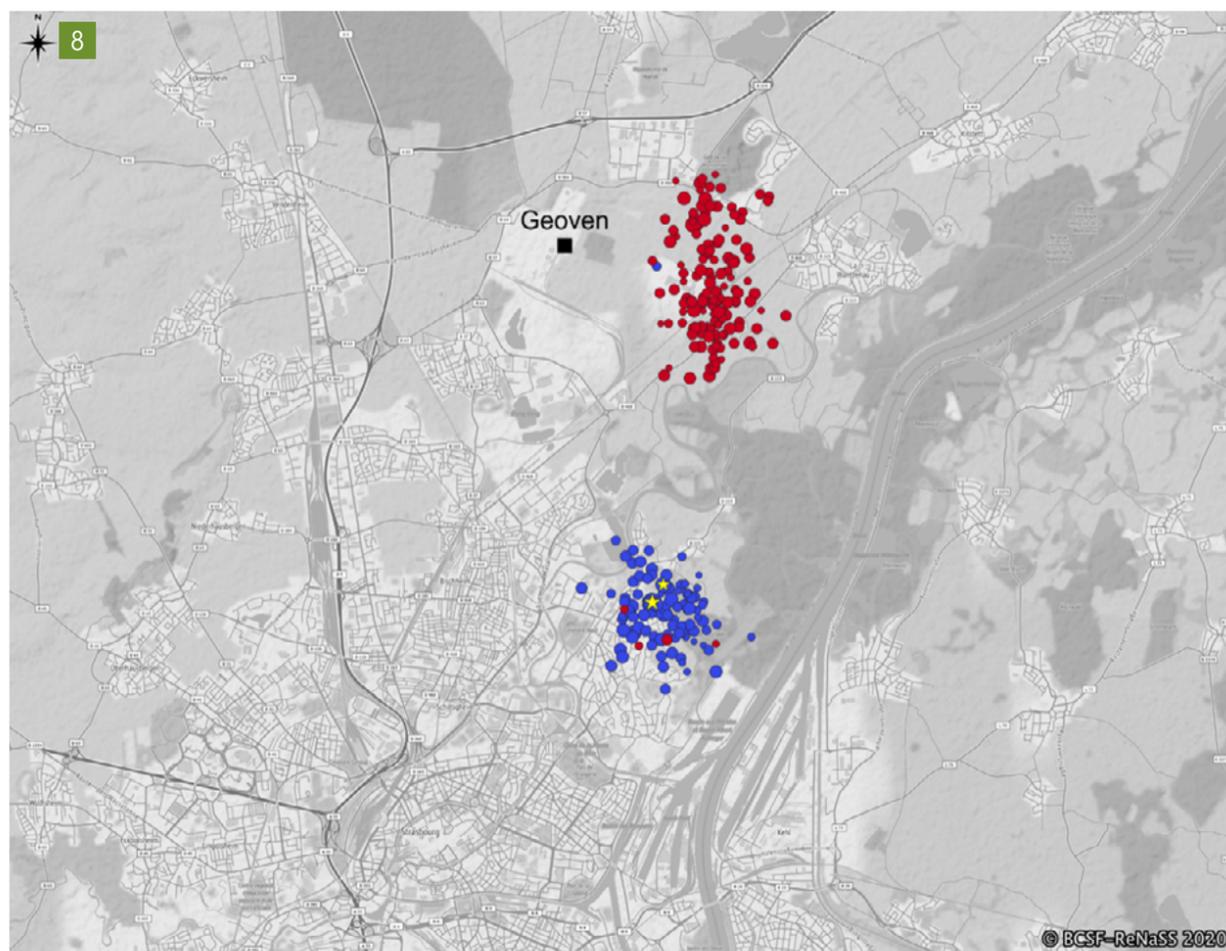
Sur le pont : François Cornet, Cécile Doubre, Marc Grunberg, Sophie Lambotte, Olivier Lengliné, Jean Schmittbuhl, Jérôme Vergne

Lettre de l'EOST n°32 : <http://eost.unistra.fr/musees/la-lettre-de-leost/>

Figure >

[8] Localisation des événements présents dans le catalogue du BCSF-RéNaSS au 29 oct.2020 dans la zone de l'Eurométropole. Les points rouges correspondent aux événements s'étant produits entre le 14 mars 2018 et le 11 nov. 2019 au soir et les points bleus ceux depuis le 12 nov. 2019. Les étoiles jaunes indiquent la localisation des séismes M<sub>v</sub>3.0 et M<sub>v</sub>2.3 du 12 nov. 2019. La tête des puits du site de géothermie profonde Geoven est indiquée par un carré noir.

Crédits : BCSF-Rénass



## LES LACS DES ZONES ARIDES À L'ÉPREUVE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES : COLLABORATION AVEC L'UNIVERSITÉ DE MELBOURNE

Une nouvelle collaboration mise en place en 2019 entre Mathieu Schuster (CNRS, IPGS) et Jan-Hendrik May (Université de Melbourne) a pour but d'explorer l'impact qu'ont pu avoir des changements climatiques, passés et d'origine naturelle, sur l'évolution des lacs situés dans des zones arides. L'objectif principal est la caractérisation de la réponse des environnements sédimentaires à ces changements, en particulier la dynamique de la zone littorale lacustre qui constitue un domaine propice au développement de la biodiversité et à l'occupation humaine. Les résultats serviront ensuite à irriguer les réflexions relatives au devenir de ces lacs réputés être fortement sensibles à la variabilité du climat. Dans le contexte des changements globaux en cours, la vulnérabilité des socio-écosystèmes associés à ces lacs est réelle.

Ce projet démarre par une comparaison inter-hémisphères ciblée sur deux très grands bassins endoréiques (c'est-à-dire sans connexion avec la mer) : celui du Lac Eyre (Kati-Thanda) dans le désert central d'Australie, et celui du Lac Tchad à la transition Sahara-Sahel. Ces lacs ont connu au cours des dernières décennies d'importantes variations de superficie, qui restent toutefois sans commune mesure avec celles qui se sont produites au cours du Quaternaire. Ainsi, le projet porte en priorité sur ces variations extrêmes, attestées par d'exceptionnelles plages fossiles apportant un enregistrement original de la mise en place de mégalacs, puis de leur disparition.

**Mathieu Schuster**

Photo > [9] Barrière littorale fossile (coin inférieur gauche) incisée par une rivière éphémère et rivage du Lac Eyre suite à la crue de 2019 (arrière-plan droit). Crédits : Mathieu Schuster



## LA DÉGRADATION NATURELLE DU CHLORDÉCONE MISE À JOUR

Les sols et le littoral antillais sont contaminés pour des siècles par un pesticide ultra-toxique, le chlordécone, un perturbateur endocrinien reconnu comme neurotoxique, reprotoxique et classé cancérigène possible dès 1979 par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Le chlordécone est réputé non-biodégradable dans l'environnement, ce qui a conduit les scientifiques à prédire des durées de contamination de l'ordre de plusieurs dizaines, voire centaines d'années selon les types de sol.

La collaboration d'un consortium regroupant six laboratoires, dont le Lhyges, a abouti à la caractérisation en laboratoire de 17 produits de transformation issus de la dégradation du chlordécone en présence de micro-organismes. L'identification de ces produits de transformation a permis de les utiliser comme standards afin de les rechercher dans l'environnement antillais et de réaliser ainsi une première étude de terrain prospective. Les résultats montrent la présence systématique de produits de transformation du chlordécone dans tous les échantillons de sols contaminés par cet insecticide, mais aussi dans les eaux de rivière, mangrove et sédiments de mangrove.

En contradiction avec les connaissances acquises jusque-là, l'étude montre que le chlordécone se dégrade bel et bien dans les sols antillais, conduisant à la libération progressive dans l'environnement de quantités importantes de produits de transformation au devenir et à la toxicité encore inconnus. La France n'en a pas fini avec le scandale du chlordécone aux Antilles, un dossier tentaculaire dont les répercussions à la fois sanitaires, environnementales, économiques et sociales sont une bombe à retardement.

**Gwénaél Imfeld**

Référence :  
Chevalier et al. 2019. *Natural Chlordecone Degradation Revealed by Numerous Transformation Products Characterized in Key French West Indies Environmental Compartments*. Environ. Sci. Technol. 53, 11, 6133-6143. DOI: 10.1021/acs.est.8b06305.

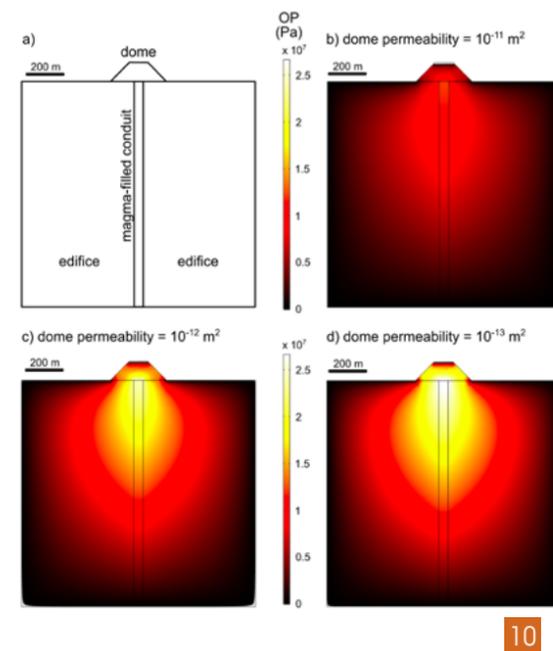
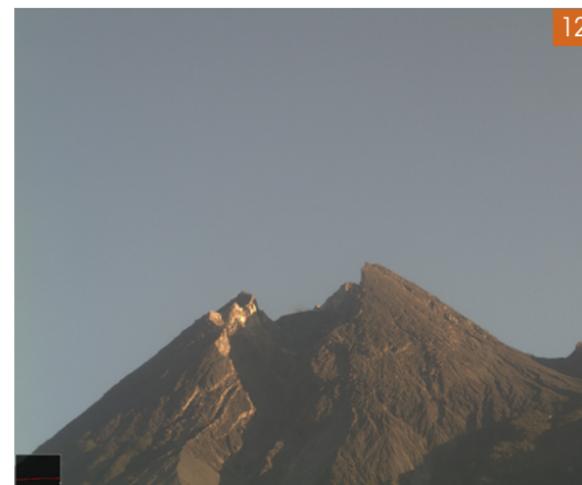


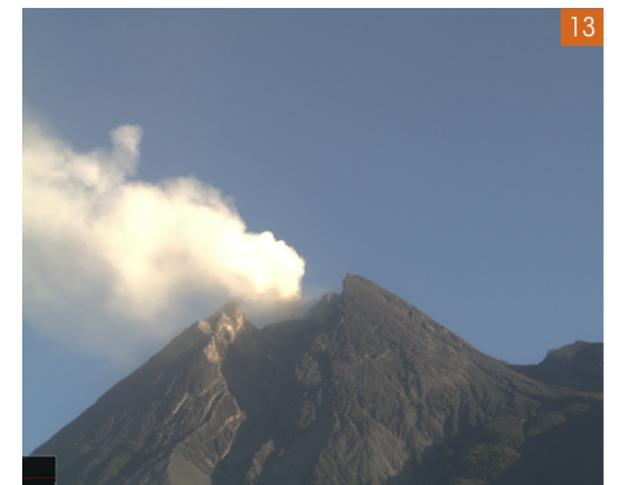
Figure >  
[10] Augmentation de la pression de pore (OP) dans un dôme de lave.  
(a) Configuration du modèle.  
(b) - (d) Modèles numériques qui montrent l'ampleur et la distribution de la pression (le blanc et le jaune représentent la haute pression et le rouge et le rouge foncé représentent la basse pression) dans les dômes de lave caractérisés par différentes perméabilités.  
(b) dôme de lave non altéré.  
(c) dôme de lave assez altéré.  
(d) dôme de lave très altéré  
Crédits : Heap et al., 2019. Nature Communications



11



12



13

## L'ALTÉRATION HYDROTHERMALE DES DÔMES DE LAVES ANDÉSITIQUES PEUT MENER À UN COMPORTEMENT VOLCANIQUE EXPLOSIF

Les volcans qui forment des dômes de lave extrudée font partie des plus dangereux sur Terre. Ces dômes de lave consistent en des empilements de laves monolithiques s'apparentant à un magma visqueux lentement extrudé au niveau du sommet du conduit volcanique. Tandis que le magma remonte à la surface, les gaz tel que le dioxyde de carbone et l'eau qui y sont piégés s'en exsolvent et peuvent alors se déplacer librement à travers le système volcanique. Toutefois, si le gaz ne peut pas atteindre la surface via un réseau perméable, la pression sous le dôme peut augmenter, favorisant ainsi un comportement explosif du système volcanique. Sur les volcans formant des dômes de lave, les explosions sont fréquentes et imprévisibles. Cela suggère non seulement qu'il existe un mécanisme réduisant la perméabilité, suffisamment pour impulser un comportement explosif mais également que ce mécanisme peut se répéter très rapidement après un événement explosif. Michael Heap (IPGS) et ses collègues ont récemment proposé, dans

un article publié dans Nature Communications, que la perméabilité d'un dôme de lave peut être réduite par altération hydrothermale, fréquente sur les volcans présentant des dômes de laves dans le monde. Cette réduction peut être suffisante pour créer la surpression de gaz nécessaire à la fragmentation des roches et du magma et au développement de l'explosivité. Cette étude souligne le rôle moteur de l'altération hydrothermale, pouvant se développer sur une période de temps allant de plusieurs mois à des années, dans le comportement explosif imprévisible fréquemment observé sur les volcans formant des extrusions de type dômes de lave. Les auteurs concluent sur l'importance de la cartographie et de la surveillance de l'ensemble des zones d'altération hydrothermale des dômes de lave actifs et de leur évolution afin de faciliter l'anticipation des événements explosifs sur ces volcans qui restent sinon imprévisibles.

**Mike Heap, Alexandra Kushnir**

Voir aussi :  
<http://www.recherche.unistra.fr/index.php?id=31084>

Référence :  
Heap M.J., Troll V.R., Kushnir A.R.L. et al., "Hydrothermal alteration of andesitic lava domes can lead to explosive volcanic behaviour". *Nature Communications* 10, 5063 (2019), doi:10.1038/s41467-019-13102-8

Photos > Volcan Merapi (Indonésie) exposant le processus décrit dans cette étude. Crédits : Thomas Walter (GFZ, Allemagne)

[11] Des gaz volcaniques peuvent s'échapper (dégazage) et la pression dans et sous le dôme n'augmente pas.

[12] L'altération hydrothermale réduit la perméabilité du dôme et empêche le dégazage, la pression sous le dôme augmente.

[13] La surpression de gaz provoque de la fragmentation et le développement d'un comportement explosif. L'explosion qui s'ensuit fournit de nouvelles voies de dégazage et le compte est remis à zéro.

## INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET GÉOPHYSIQUE, TOUR D'HORIZON DES PROJETS EN COURS

L'apprentissage machine est de plus en plus répandu dans les Géosciences. Cette appellation regroupe un ensemble de techniques permettant d'extraire des informations directement des données à l'aide d'outils d'optimisation.

Un certain nombre de scientifiques de l'IPGS et du Lhyges travaillent sur ce sujet. C'est pourquoi nous avons mis en place un groupe de travail thématique en septembre 2019 à l'Est. L'idée générale est de créer une dynamique de groupe dans le but de faciliter l'apprentissage des concepts et des méthodes de l'apprentissage machine, d'un point de vue théorique comme pratique. Ainsi, chaque semaine, nous nous réunissons pour discuter d'une méthode particulière ou pour suivre ensemble un tutorial. Pour 2020, nous avons également prévu d'inviter des experts sur le sujet afin de parfaire notre formation autour de ce thème d'actualité.

Cédric Twardzik

### L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA DISCRIMINATION D'ÉVÉNEMENTS NATURELS ET NUCLÉAIRES

Distinguer les tremblements de terres des explosions nucléaires automatiquement et avec seulement des données brutes est l'objectif du projet. Pour atteindre cet objectif, nous utilisons un jeu de données composée des essais nucléaires de la Corée du Nord et des tremblements en Asie de l'Est. Les enregistrements proviennent des capteurs sismiques situés dans la même région que les événements mais, en théorie, ce n'est pas une condition nécessaire.

En utilisant, d'une part les données sismiques des capteurs qui enregistrent dans plusieurs bandes de fréquences et d'autre part l'apprentissage machine de type réseau de neurones artificiels, nous pouvons classer chaque enregistrement comme un séisme ou une explosion. Nous avons réussi à classer avec précision les enregistrements avec deux types de réseaux neuronaux : un réseau neuronal logistique et un réseau neuronal récurrent, qui est plus complexe, car il garde la trace de l'ordre de chaque point de données.

Les limites de ce projet incluent le fait que les données source de l'apprentissage doivent être étiquetées (identification du type d'événement). Cependant, l'idée de pouvoir suivre les essais nucléaires est importante pour la sécurité internationale et nous aide à comprendre en quoi les mécanismes physiques qui produisent les ondes sismiques et ceux qui produisent les ondes explosives sont différents.

Cooper Harris

14

### APPRENTISSAGE MACHINE POUR L'ANALYSE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN EN ALASKA

Une équipe de l'EOST a étudié les glissements de terrain qui se sont produits en Alaska entre 1995 et 2017 à partir d'enregistrements sismologiques permettant de les détecter sur de grandes distances. Les chercheurs ont mis au point des algorithmes novateurs d'apprentissage machine pour analyser les chroniques de données enregistrées en continu par 243 sismographes déployés dans cette région du monde. Ils ont ainsi pu établir qu'en Alaska, le nombre de glissements de terrain est en constante augmentation depuis le début des années 2000, une augmentation qui pourrait être potentiellement corrélée à l'augmentation annuelle de la température moyenne."

Clément Hibert

En savoir plus : <https://lc.cx/mK9W>

Figure > [14] Photographie aérienne du glissement de terrain d'Orville-Wilbur (Alaska) dont la date exacte d'occurrence a pu être déduite grâce à une détection sismologique. Crédits : Marten Geertsema, Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development (Canada)



### COMPRÉHENSION ET PRÉDICTION DE LA SISMICITÉ INDUITE EN UTILISANT L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Compréhension et prédiction de la sismicité induite en utilisant l'intelligence artificielle :

L'une des principales difficultés de la géothermie profonde est la sismicité induite dont l'origine n'est pas encore bien comprise. En effet, lors d'injection d'eau sous pression (stimulation du réservoir) ou lors de la circulation d'eau dans le réservoir géothermique pendant l'exploitation, une sismicité peut se développer à des échelles et des magnitudes très différentes, depuis le microséisme associé à une micro-rupture jusqu'au séisme perçu par la population en surface. On observe généralement de nombreux séismes qui

se produisent jusqu'à plusieurs jours après l'arrêt de l'injection. On constate même que les plus gros séismes liés à l'injection sont majoritairement présents après l'arrêt de l'injection (par exemple le séisme de magnitude 3,4 qui est survenu quelques heures après l'arrêt de l'injection sur le site géothermique de Bâle en 2006).

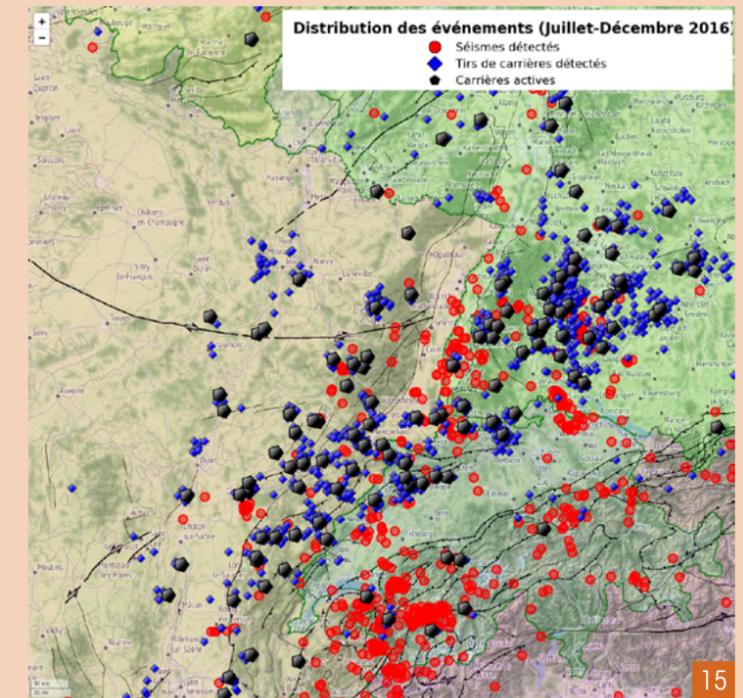
Kamel Drif

La thèse de Kamel Drif, sous la direction de Jean Schmittbuhl (IPGS), vise à comprendre et prédire le comportement du réservoir géothermique en utilisant la sismologie, la géomécanique et l'intelligence artificielle.

### DÉTECTER LES SÉISMES DANS LES ZONES HAUTEMENT ANTHROPOSÉES

Une zone hautement anthroposée est une zone densément peuplée avec une activité humaine très intense. C'est le cas du Nord-Est de la France. Dans de telles zones, les stations sismologiques enregistrent à la fois une grande quantité de bruit environnemental et de signaux reliés aux activités humaines, comme la géothermie ou les carrières. De plus, les séismes qui sont enregistrés dans ces régions sont principalement de faible magnitude (< 3). Des séismes de plus forte magnitude peuvent cependant avoir lieu sporadiquement (> 5) : le séisme historique destructeur de Bâle en 1356 en est un témoignage. Les mécanismes à l'origine de ces plus forts séismes infréquents sont encore mal connus.

Détecter plus finement les séismes dans ces zones intraplaque densément peuplées et à activité économique sensible est un enjeu majeur pour améliorer notre connaissance sur l'occurrence de ces séismes. Seulement, mieux détecter les séismes (plus grand nombre, plus faible magnitude) implique de diminuer les seuils de détection. Si l'on diminue ces seuils, les systèmes d'alerte des événements se trouvent rapidement encombrés par une forte quantité de faux événements liés au bruit ainsi que d'événements anthropogéniques (principalement des tir de carrière). Les analystes qui identifient



15

manuellement tous ces événements arrivent vite à saturation, perdent du temps à discriminer des fausses alarmes, et sont contraints à un compromis vitesse-précision.

Afin d'alléger la tâche des analystes et d'augmenter leur capacité décisionnelle, l'intelligence artificielle est utilisée ici pour une discrimination robuste et automatique de chaque type d'événement : fausses alarmes, séismes et tirs de carrière. L'objectif est de générer avec un

meilleur compromis vitesse-précision des catalogues de séismes préalablement discriminés plus complets.

Alexandra Renouard

Le travail d'Alexandra Renouard s'effectue dans le cadre d'une thèse sous la direction de Alessia Maggi, Cécile Doubre et Marc Grunberg (IPGS-East)

Figure > [15] Crédits : Alexandra Renouard

### UTILISATION DES « DEEP LEARNING NEURAL NETWORKS » POUR LA MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

Les études des écoulements souterrains s'appuient souvent sur la modélisation numérique. Le projet de Marwan Fahs, conduit au sein du Lhyges en collaboration avec le laboratoire ICube, vise en 2 ans à explorer les capacités de méthodes d'apprentissage profond par réseaux de neurones (Deep Learning Neural Networks - DLNNs) pour la modélisation des écoulements souterrains.

L'utilisation des réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks - ANNs) en hydrogéologie date des années 90. Les réseaux de neurones ont connu un développement considérable ces dernières années avec l'apparition des techniques d'apprentissage profond (DLNNs) et leur utilisation dans différents domaines scientifiques. Cependant, ce n'est que depuis très récemment que l'utilisation des DLNNs a fait son apparition dans le domaine de l'hydrogéologie. Ce projet de recherche repose sur deux axes de recherche principaux. Le premier axe consiste à évaluer la performance des DLNNs en tant que modèle de substitution (remplacement du modèle physique). En outre, l'utilisation des DLNNs pour la résolution des équations aux dérivées partielles représente un nouveau sous-domaine de l'apprentissage automatique connu sous le nom d'apprentissage automatique scientifique (Scientific Machine Learning- SciML). Ainsi, dans le second axe, ce projet cherche à utiliser les SciML pour la modélisation des écoulements souterrains.

Marwan Fahs

Participants : Marwan Fahs et François Lehmann (Lhyges),  
Florence Le Ber, Gabriel Frey (ICube, Science des Données et Connaissances)

### A2S : L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET LE CALCUL HAUTE PERFORMANCE APPLIQUÉS AUX IMAGES SATELLITES !

Détecter automatiquement et en temps court des changements de propriétés de la surface de la Terre (champ de déformation de glaciers, glissements de terrain, surfaces en eau) à partir de séries temporelles massives d'images satellites est l'objectif de la plateforme multi-laboratoires A2S. En associant calcul haute performance, apprentissage machine de type forêt aléatoire, et des systèmes de gestion de processus de calculs, A2S permet par exemple d'observer et de cartographier les glissements de terrain déclenchés après des événements extrêmes. Ces travaux sont menés par deux

jeunes chercheurs, Aline Déprez et Sina Nahostin, qui développent une méthode innovante (imClass) de détection générale d'objets à partir de boucles d'apprentissage actif. Ces méthodes ont été appliquées sur des cas récents de catastrophes gravitaires en Haïti, à Taiwan, au Mozambique et au Kenya. L'intelligence artificielle permet en quelques heures, à condition que les données soient disponibles, de détecter ces changements sur de grands territoires.

Jean-Philippe Malet

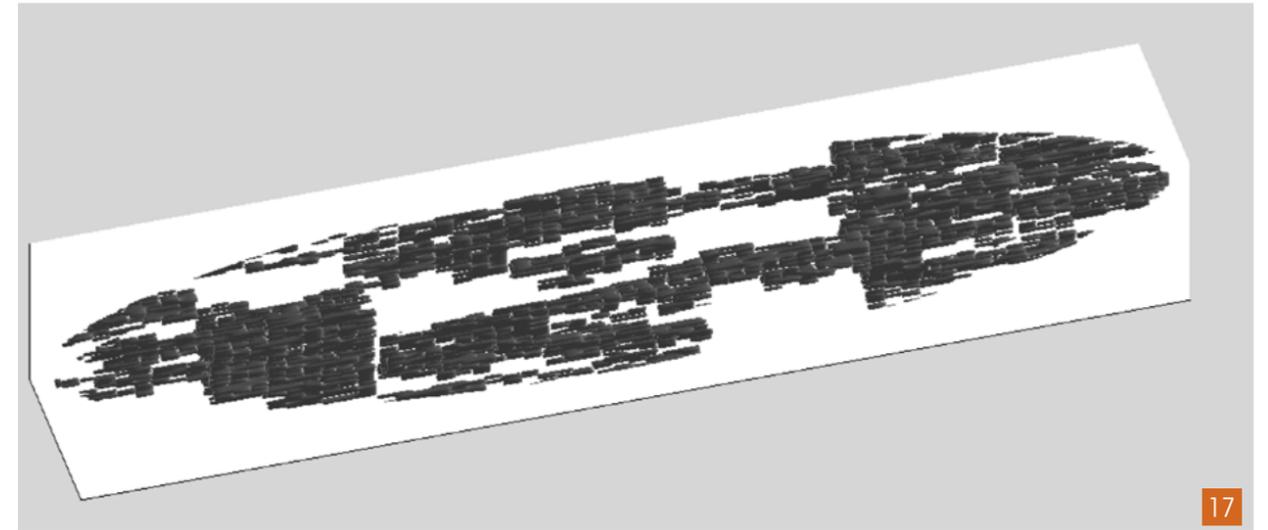
Figure >

[16] Détection automatique de glissements de terrain suite au cyclone Idai au printemps 2019 au Mozambique. L'algorithme imCLASS (Déprez et al., 2019) associant une méthode de classification par forêts aléatoires et des boucles d'apprentissage actif a permis de proposer une carte d'occurrence à partir des images satellitaires multi-spectrales Sentinel-2 et d'un modèle numérique d'élévation. Crédits : Aline Déprez



16

## 'OUMUAMUA, PREMIER ASTÉROÏDE INTERSTELLAIRE OBSERVÉ, POURRAIT ÊTRE UN GIGANTESQUE MOUTON DE POUSSIÈRES FRACTAL



17

Dans un article publié dans *Astrophysical Journal Letters* le 11 novembre 2019, Eirik Flekkøy et Jane Luu, de l'Université d'Oslo, et Renaud Toussaint, de l'Eost/IPGS, relatent leurs recherches sur la possibilité d'une structure fractale d'Oumuamua, cet objet interstellaire, qui a traversé le système solaire et été découvert à l'Automne 2017 par le télescope Pan-Starrs à partir d'un observatoire à Hawaï.

Contrairement aux planètes du système solaire, astéroïdes et comètes observées jusque-là, qui ont une trajectoire fermée, elliptique, cet objet avait une trajectoire hyperbolique, qui ne se referme pas sur elle-même : il en a été conclu qu'il vient d'un autre système stellaire, et il a été classé dans le système international comme 1I/Oumuamua, le 1I désignant le 1er astéroïde observé, I pour interstellaire. Il a été observé alors qu'il s'éloignait (pour toujours) du Soleil.

Son nom choisi, Oumuamua, en polynésien, signifie « visiteur », ou « éclairateur ». On a pu déterminer sa taille, de près de 400 mètres de long, à partir de sa luminosité, et à partir des variations de luminosité, on a pu en déduire qu'il présentait une forme rare, très allongée. L'étude détaillée de ses observations par de nombreuses équipes d'astronomes a mené

à une autre surprise : lors de son passage, il a accéléré nettement plus que ne pourrait l'expliquer l'attraction gravitationnelle du Soleil, parcourant près de 100 000 kilomètres de plus que prévu.

La cause courante de telles accélérations non gravitationnelles est un effet de réaction, comme dans une fusée, lors du dégazage par sublimation de glace, produisant des queues cométaires. Cependant, le taux de dégazage nécessaire pour expliquer une telle accélération, pour un astéroïde ou une comète de densité classique, était dans ce cas au moins mille fois supérieur à ce qu'il pouvait être sur Oumuamua, celui-ci ne présentant pas de queue cométaire détectable.

La cause logique de cette accélération devait donc être la pression du vent solaire, c'est à dire les particules issues du Soleil qui viennent pousser la face exposée de l'astéroïde. Mais pour expliquer cette accélération par le vent solaire, la densité moyenne de l'objet, (rapportée à sa longueur au cube), doit être extrêmement basse, autour de 10 grammes par mètre cube – près de 100 fois moins que l'air qui nous entoure sur Terre.

Des débats échauffés ont eu lieu sur la structure possible d'un grand objet aussi peu dense. Il a par exemple été évoqué qu'une voile extrêmement fine, telle que

Illustration >

[17] Le visiteur interstellaire Oumuamua, considéré comme un amas de poussière ramifié ou comme une grosse pierre. Les deux images sont hypothétiques.

Crédits : R. Toussaint et al., IPGS, CNRS-Univ. Strasbourg / PoreLab & Theoretical Center for Astrophysics, Univ. Oslo

celle inventée par les humains pour voyager entre systèmes stellaires à l'aide du vent solaire, aurait la densité requise. La communauté des astronomes, dans l'ensemble, imagine d'autres causes qu'une origine technologique extra-terrestre à cette densité. Amaya Moro-Martín, une astronome du Space Telescope Science Institute de Baltimore, a proposé qu'une structure fractale, où Oumuamua serait composé d'un agrégat de poussières de tailles allant de centaines de nanomètres à des dizaines de micromètres pourrait expliquer une telle densité.

Dans l'article de novembre 2019, les auteurs montrent qu'une telle structure résisterait en effet, mécaniquement, aux forces auxquelles elle est soumise lors de sa traversée du système solaire : la pression du vent solaire, les forces de marées dues au Soleil et au planète, et en premier lieu, les forces d'inertie dues à sa propre rotation – Oumuamua faisant un tour sur lui-même, approximativement autour de son axe court, en huit heures environ.



De plus, les variations de période de rotation de l'astéroïde peuvent être expliquées par la réémission de la lumière absorbée sous forme de rayonnement infrarouge, selon le modèle du corps noir – un effet connu sous le nom de Yorp. Cet effet peut expliquer ces variations de période car cet objet présente cette densité extrêmement basse.

Si 'Oumuamua est très fragile – il s'écroulerait sous son propre poids s'il était à la surface de la Terre – les calculs montrent que l'espace interplanétaire et interstellaire est en fait un lieu très tranquille, ou de tels grands objets fragiles peuvent exister. Les mystères associés à cet objet sont nombreux, et toujours à l'étude. L'étude

confirme qu'il peut s'agir d'un agrégat de poussière (communément appelé un « mouton », comme ceux sous les meubles, ou un « dustbunny », en anglais, un lapin de poussière – mais mesurant plusieurs centaines de mètres !). De tels astéroïdes poussiéreux (« fluffy asteroids », en anglais) sont régulièrement observés derrière les comètes, ou sur terre, en provenance de la haute atmosphère. Jusque-là, les astéroïdes observés n'étaient jamais d'une taille supérieure à quelques millimètres ou centimètres. Un élément manque toutefois dans les modèles de formation des astéroïdes et planètes à partir des nuages de gaz interstellaires, l'agrégation dans les tailles allant du centimètre aux dizaines de kilomètres étant encore mal comprise (les modèles tendent à faire exploser les petits objets qui s'agrègent à des tailles métriques à kilométriques lors des collisions, plutôt qu'à les agréger). 'Oumuamua pourrait représenter un des premiers objets de type élément manquant dans ces modèles de formation de protoplanètes.

L'histoire ne s'arrête bien sûr pas là : on a découvert fin août 2019 le second astéroïde interstellaire, 2I/Borisov, qui traverse

actuellement le système solaire, scruté par de nombreuses équipes. Il s'agit cette fois d'une comète interstellaire, apparemment très différente. Le télescope Pan-Starr ayant été construit pour détecter de tels objets sombres et « scanner » le ciel systématiquement, ces astéroïdes et comètes interstellaires ne sont probablement que les premiers d'une famille de visiteurs interstellaires qui sera découverte plus en détails ces prochaines années.

**Renaud Toussaint**

Référence :  
Flekkøy, Eirik G., Luu, Jane & Toussaint, Renaud, 2019.  
The Interstellar Object 'Oumuamua as a Fractal Dust Aggregate. *The Astrophysical Journal*. Vol. 885, n° 2 pp. L41 - DOI 10.3847/2041-8213/ab4f78  
L41 - DOI 10.3847/2041-8213/ab4f78  
En accès libre sur UnivOak: <https://lc.cx/mKKA>

Illustration >

[17] Wikimedia, ESO/M. Kormmesser, CC BY 4.0 - <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64361447>

## PASSAGE DE FLAMBEAU À LA TÊTE DES COLLECTIONS DU MUSÉE DE MINÉRALOGIE

Après 30 années passées au Musée de minéralogie en tant que conservateur des collections, Denis Lepold a fêté son départ en retraite, entouré de ses collègues, le 28 novembre 2019. Depuis 1990, plus de 12000 objets ont été recensés (minéraux, instruments anciens, plaques photographiques, modèles cristallographiques etc.) et l'ouverture du musée au grand public a permis d'accueillir à ce jour 40 325 visiteurs in situ ! Le départ de Denis Lepold intervient à l'issue d'une période de transition où il a travaillé en tandem avec Barbara Gollain, arrivée en novembre 2016 en tant que chargée de collections de minéralogie. Ce passage de relais se poursuit dans la durée et continuera à bénéficier aux collections puisque Denis Lepold interviendra sur des missions spécifiques dans le cadre de l'association G-Pé-To, Géosciences pour tous.

Ces deux dernières années, la visibilité du musée auprès de confrères français ou européens s'est accrue, notamment au travers d'expositions hors les murs au sein des bourses aux minéraux de Munich, Sainte-Marie aux mines, mais également dans d'autres structures muséales ou universitaires. En étroite collaboration avec les médiateurs scientifiques du Jardin des sciences, et suite à une hausse des demandes de la part des enseignants, deux nouveaux ateliers pour les scolaires ont été créés à l'intention des cycles 3, du CM1 à la 6ème (Les aventures de mamie Cailloux) et cycles 4, de la 5ème à la 3ème (Enquête au musée : les minéraux du quotidien).

En ce début d'année 2020, de nombreux projets et actions sont en cours. Le travail de développement engagé avec la Direction du Numérique de l'Université de Strasbourg sur la base de données des Archives ouvertes en sciences de la Terre (Aost) devrait permettre d'engager une démarche d'inventaire et de numérisation des collections, qui commenceront donc à être publiquement visibles (item par item) d'ici la fin de l'année 2020.

Si les activités de nettoyage et de reconditionnement des spécimens se poursuivent, une réflexion autour de la scénographie globale des collections devra être menée pour apporter plus de contenu pédagogique au sein des espaces d'expositions. Nous réfléchissons également à créer des vitrines thématiques au sein de la première salle d'exposition, qui traiteraient de sujets précis tels que les bio-minéralisations, les enjeux actuels autour de l'exploitation de nouveaux minerais, etc.

Dans quelques mois, vous aurez l'occasion de retrouver nos spécimens hors les murs, notamment nos pierres précieuses au sein de l'exposition « L'oeil de Huysmans Manet, Degas, Moreau » au Musée d'art moderne et contemporain de Strasbourg (3 avril au 19 Juillet), ou encore des minéraux à l'ancienne Manufacture royale d'armes blanches de Klingenthal à partir du mois



18

d'avril. Quelques surprises vous attendent également cette année lors de la nuit des musées et, au début de l'été, pour un événement spécial créé conjointement avec le planétarium de l'université de Strasbourg : nous n'en dirons pas plus !

Que faut-il nous souhaiter pour l'année 2020 ?

Permettre de faire avancer la recherche grâce à la rareté et la spécificité de nos collections, et pour cela l'année commence bien ! Nous venons de réaliser des prélèvements sur l'ensemble des ambres du musée dans le cadre des recherches menées par l'équipe de biogéochimie moléculaire du CNRS (Institut de chimie) et l'Inrap Grand-Est. Affaire à suivre !

**Barbara Gollain, Responsable des collections de minéralogie**

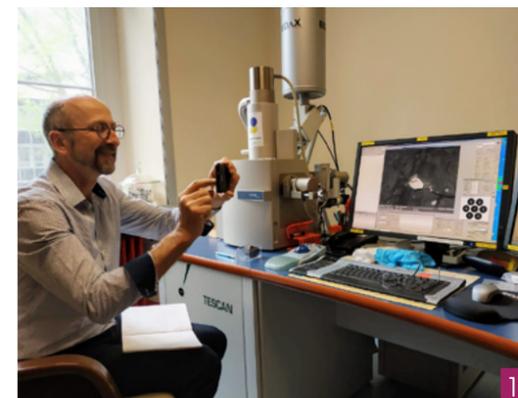
Photos >

[18] Barbara Gollain et Denis Lepold lors du Mineral Show de Munich - Crédits : B. Gollain

[19] Denis Lepold fait analyser une météorite récemment découverte - Crédits : B. Gollain

Pour suivre l'actualité du musée, rejoignez notre page Facebook : @MineralEOST  
Musée ouvert les mercredi après-midi (13h30 – 18h, hors vacances scolaires)

Vous êtes étudiant ou personnel ? N'hésitez pas à contacter Barbara Gollain pour planifier une visite au musée (français / anglais).



19



17



## EXPOSITION LES BRUITS DU TEMPS II

Le travail de recherche-création mené par Arno Gisinger au sein de l'Eost a donné lieu à une première exposition au Frac Alsace   Sélestat, entre le 12 octobre et le 19 janvier 2019. Le second volet du projet est montré à la galerie La Chambre   Strasbourg depuis le 18 janvier.

Cette exposition réactive les collections photographiques de l'Eost sauvées et conservées par Valérie Ansel. Afin de représenter au mieux la corrélation entre photographie et sismologie, une machine est présentée dans l'espace d'exposition. Imaginée par Arno Gisinger et conçue par Pascal Zagari (artiste plasticien installé à Strasbourg), elle s'inspire du mécanisme d'un sismographe : le Rebeur-Paschwitz.

Cet appareil, conçu par Ernst von Rebeur-Paschwitz (1861-1895) en 1888, a été le premier capable d'enregistrer des séismes à distance sur un support photographique. Imaginé à l'origine pour relever les variations de gravité dues aux astres, il est en fait capable d'enregistrer les ondes sismiques grâce à un pendule horizontal mobile, muni d'un miroir. En laissant pénétrer un rayon de lumière par une petite ouverture, on peut enregistrer le faisceau lumineux réfléchi sur du papier photographique (pour cela, la machine doit être dans l'obscurité la plus totale). Un exemplaire de cet instrument a été entièrement rénové en 2012. Il est exposé au musée de sismologie de Strasbourg et constitue l'élément le plus ancien de la collection.

  l'instar du Rebeur-Paschwitz, la machine présentée dans la chambre noire capte des ondes et les retranscrit sur du papier — non pas photographique ici, mais phosphorescent. Ce ne sont cependant pas les ondes du sol que la machine relève mais un son de basses-fréquences. L'ordonnancement des impulsions envoyées à la machine a été composé par Thierry Blondeau. Un ressort installé sur un haut-parleur bouge de concert avec les membranes du haut-parleur. Un pendule horizontal est attaché au ressort et projet , via un miroir, un faisceau lumineux sur le papier phosphorescent, y laissant ainsi une trace éphémère.

*Valérie Ansel*

*L'exposition est ouverte du 17 janvier au 8 mars  
du mercredi au dimanche de 14h   19h.  
Adresse : La chambre - 4 place d'Austerlitz   Strasbourg  
[www.la-chambre.org](http://www.la-chambre.org)*



*Illustrations >*

*[20] Le sismogramme des secousses enregistrées lors du bombardement de Strasbourg des 11 et 12 août 1944. Papier noir de fumée sur sismomètre Xiechert, conservé au musée de sismologie.*

*Numérisation du document : Romain Darnaud, Paris. Crédits photo : Arno Gisinger.*

*[21] Installation d'Arno Gisinger, Pascal Zagari et Thierry Blondeau - Crédits : Nicolas Bailleul*

*[22] La Galerie La chambre, 4 place d'Austerlitz   Strasbourg - Crédits : Nicolas Bailleul*