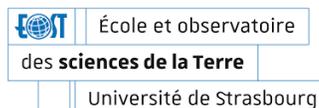




Éditorial ... 4
Introduction ... 5
Évaluation à mi-parcours ... 7
Projets de recherche internes ... 12
Projets de recherche nationaux et inter-
nationaux ... 24
Valorisation et communication ... 30
Graduate program ... 36
Bilan Financier ... 44
Événements marquants ... 47
Témoignages ... 48

En partenariat avec :



Directeur de la publication : J. Schmittbuhl et C. Correia
Rédaction : C. Correia avec la participation des working
group leaders
Mise en page C. Correia
Impression : imprimerie de l'Université de Strasbourg
L'ensemble des images et diagrammes présentés dans ce
rapport sont à créditer à l'EOST / ITI GeoT
@ITI GeoT - 2025

Retour sur les années 2023 et 2024 - La confirmation de l'ITI GeoT

Par Jean Schmittbuhl, Directeur de l'ITI



Les années 2023 et 2024 ont marqué un tournant significatif pour l'ITI GeoT, un programme ambitieux et interdisciplinaire centré sur l'exploration et l'exploitation des géoressources du sous-sol dans le cadre de la transition énergétique. Ce programme pluriannuel a franchi une étape décisive lors de son évaluation à mi-parcours, soulignant son engagement dans la recherche sur les eaux profondes pour la géothermie, l'hydrogène natif, le lithium géothermal, ainsi que le stockage de chaleur et de CO₂.

Grâce à une structure organisée en groupes de travail disciplinaires, l'ITI GeoT s'est imposé comme un pôle de compétences incontournable, tant au niveau régional que national. Sa participation active dans des projets d'envergure, tels que le PEPR Sous-sol au niveau national et divers projets européens comme DEEP, DT-GEO, GeoInquire et Geotwins, témoigne de son engagement et de son influence croissante. L'ITI GeoT a également joué un rôle déterminant dans la gestion des implications socio-économiques des événements sismiques récents dans la région de Strasbourg. Le pilotage du projet 'Fossé Rhéna' dans le cadre du PEPR, en partenariat avec le BRGM, souligne la reconnaissance de son rôle stratégique dans la structuration de la communauté scientifique nationale.

En tant qu'acteur majeur de la recherche dans le Grand Est et au niveau national, l'ITI GeoT collabore étroitement avec les acteurs industriels et institutionnels, démontrant l'engagement de l'Université dans la réflexion sur les nouvelles ressources énergétiques nécessaires à la transition énergétique. Ce pôle de compétences interdisciplinaires se positionne également comme un acteur clé dans le dialogue entre la science et la société, répondant aux nombreuses interrogations sociétales liées à l'utilisation du sous-sol. Son implication dans l'analyse de la crise sismique de Strasbourg de 2019 à 2021, le retour d'expérience, et la mise en place de bonnes pratiques, ainsi que sa participation à la mission parlementaire d'information sur les conséquences de la géothermie profonde, en sont des exemples marquants. Le projet de création d'un observatoire des réservoirs profonds pour un partage large d'informations sur les géoressources exploitées témoigne de sa vision prospective et de son engagement continu en faveur d'une transition énergétique durable.

Institut thématique interdisciplinaire - Géosciences pour la transition énergétique | ITI GeoT

Une structuration unique du lien « recherche-formation »

Fondé en 2021, l'Institut thématique interdisciplinaire - Géosciences pour la Transition Énergétique (ITI GeoT) mène des travaux novateurs sur un enjeu de premier plan : le rôle des eaux profondes du sous-sol dans le développement de ressources énergétiques décarbonées telles que la géothermie, l'hydrogène, le lithium, le stockage de chaleur ou de CO₂. Cette approche s'inscrit dans le contexte des défis posés par la crise écologique mondiale. L'Institut puise son expertise dans le succès du LabEx G-eau-thermie Profonde et vise à approfondir les connaissances scientifiques sur les systèmes géologiques profonds, leur exploitation, leur surveillance, ainsi que la gestion des risques, la protection de l'environnement et les perceptions sociétales.

L'ITI GeoT structure un axe de recherche transversal de haut niveau au sein de l'Université de Strasbourg. Son périmètre de collaboration est vaste, incluant l'EOST, avec son observatoire (UAR) et son unité de recherche (ITES), son centre de données (CDGP), ainsi que les laboratoires ICUBE (équipe Génie Civil et Énergétique), LISEC, CREM et SAGE (sciences sociales). Depuis sa création, l'Institut bénéficie des données de haute qualité fournies par les observatoires de l'EOST (BCSF-Renass, OBSNEF, RENAG) et des plateformes instrumentales de l'établissement, dans une démarche de science ouverte.

L'ITI GeoT joue un rôle clé en tant qu'acteur régional (en lien avec les opérateurs industriels, la DREAL Grand Est et l'Eurométropole de Strasbourg), national (PEPR Sous-Sol) et international, répondant ainsi à des enjeux sociétaux, économiques et environnementaux majeurs. L'Institut al-

lie recherche de pointe et formation de haut niveau, avec une approche interdisciplinaire et internationale, tout en collaborant avec des acteurs industriels, des partenaires politiques et des institutions publiques de recherche. Parmi ses perspectives futures, l'ITI GeoT envisage de pérenniser ses actions par la création d'un Observatoire des Réservoirs Profonds (ORP) au sein de l'EOST.

Côté scientifique, l'Institut a généré des avancées significatives tant disciplinaires qu'interdisciplinaires (avec 22 publications, 37 présentations lors de congrès et 2 distinctions). Il a également obtenu de nouveaux financements pour des projets nationaux et internationaux, représentant un effet de levier important (plus de 3 millions d'euros obtenus sur 3 ans, en complément des dotations ITI).

Côté formation, l'ITI GeoT a développé un programme Graduate multidisciplinaire, en collaboration avec l'IFP School. Ce cursus englobe les géosciences, la géologie, l'ingénierie ainsi que les sciences humaines, attirant ainsi des étudiants nationaux et internationaux. Ce projet marque une évolution majeure des formations en géosciences proposées à l'EOST, orientées vers la transition énergétique. L'objectif affiché est de positionner l'école comme un leader dans la formation d'une nouvelle génération de géoscientifiques spécialisés en énergies renouvelables.

Des objectifs pluridisciplinaires

L'énergie géothermique profonde pour une énergie décarbonée

- Développer des modèles géologiques innovants des réservoirs fracturés profonds en particulier dans le contexte continental (e.g. le fossé rhénan)
- Améliorer la viabilité économique et la rentabilité des réservoirs d'eau profonde du sous-sol grâce à la coproduction de ressources, notamment le lithium, l'hydrogène, la chaleur et le stockage

Exploration et caractérisation des réservoirs d'eau profonde

- Développer les techniques d'imagerie géophysique novatrices et « à faible coût » pour réduire le coût de l'exploration
- Étudier les interactions roches-fluides impliquées dans les réservoirs profonds afin d'améliorer les stimulations anthropiques de ces réservoirs et anticiper leur déformation à long terme

Exploitation des ressources d'eau profonde du sous-sol

- Développer des approches robustes d'optimisation en temps réel de l'exploitation sur site, associant la surveillance des risques
- Développer l'ingénierie des pompes de production à hautes températures et en condition d'exposition aux fluides corrosifs et aux précipitations massives

Gestion des risques

- Améliorer le suivi de la déformation asismique dans le réservoir et de la nucléation des événements sismiques
- Développer des modèles de réservoirs géomécaniques qui utilisent des outils d'intelligence artificielle (IA) pour mieux calibrer les systèmes d'alerte (TLS)
- Proposer des structures d'expertise et de suivi multipartites qui incluent les opérateurs industriels et les institutions publiques
- Réalisation de guides de bonnes pratiques

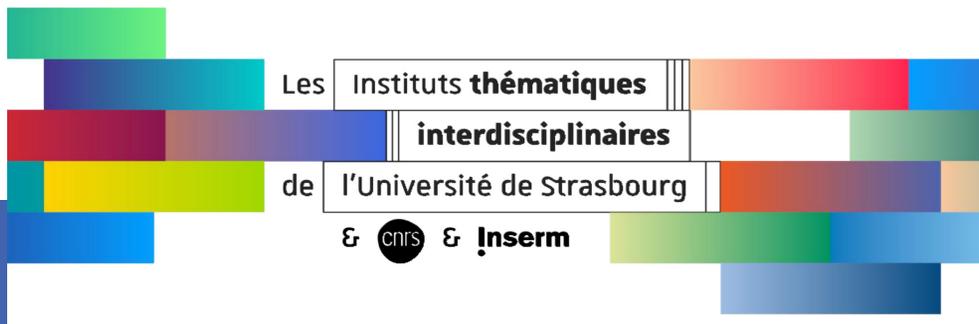
Engagement et perception du public

- Comprendre le rôle des interactions socio-technologiques dans la perception publique des projets de géo-énergie impliquant l'eau profonde du sous-sol
- Suivre l'évolution de la couverture médiatique des projets
- Mesurer l'impact des initiatives émergentes de science citoyenne

Évaluation à mi-parcours :

Dans le cadre des Laboratoires d'excellence (LabEx) et en complémentarité avec les Écoles universitaires de recherche (EUR), l'Université de Strasbourg, en collaboration avec le CNRS et l'Inserm, a lancé en 2019 un appel à projets innovant, soutenu par le programme Initiative d'Excellence (IdEx). Cet appel vise à labelliser et soutenir financièrement des projets baptisés « Instituts thématiques interdisciplinaires (ITI) ».

Après un processus d'évaluation rigoureux basé sur des standards internationaux, le comité décisionnel a sélectionné 15 projets pour leur attribuer le statut d'ITI. Une évaluation à mi-parcours, intégrée dès le lancement de la programmation, est prévue afin de garantir le maintien ou l'arrêt des projets selon les mêmes standards de qualité.



Lettre de cadrage – Programmation ITI

L'évaluation à mi-parcours constitue une étape importante de la programmation ITI, dont l'objectif est double. Il s'agit pour les projets ITI d'être évalués sur leur phase de lancement et leurs perspectives et évolutions sur la seconde période (2025-2028). Il s'agit d'autre part pour l'Université de Strasbourg et ses partenaires, de consolider la programmation initiale afin d'assurer un ancrage de site fort, visible au plan national, international et attractif.

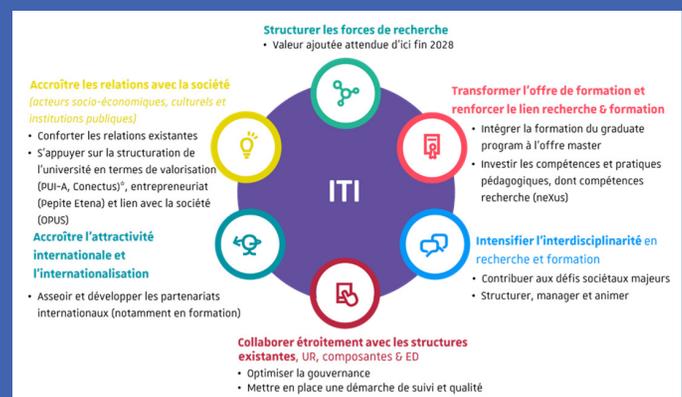
Evaluation de la phase de lancement (2020-2024)

Elle vise avant tout à évaluer les ITI par rapport à la trajectoire décrite dans le projet initial. Elle doit ainsi s'assurer de l'effectivité des projets en lien avec les critères du cahier des charges initial, en mettant en lumière les premières réalisations et effets transformants associés. Des preuves tangibles de ces réalisations sur les différents volets identifiés sont attendues. L'évaluation prendra en compte les avancées/accomplissements de chacun des ITI par rapport à la trajectoire prévue au vu des moyens alloués et de l'historique des communautés (ex-LabEx, cluster recherche émergent, EUR).

Perspectives et évolutions (2025-2028)

Sur la base de l'analyse FFOM, cette partie permettra de décrire les perspectives et évolutions du projet ITI sur l'ensemble des éléments caractéristiques d'un ITI (en miroir de la partie bilan). Il s'agira également d'intégrer les éléments suivants, visant à valoriser les expérimentations menées, en prenant en compte les évolutions tant institutionnelles que celles opérées au niveau national :

- Répondre aux enjeux de structuration de la formation par la recherche dans une logique de pérennisation et de montée d'échelle.
- Prendre en compte les orientations politiques de l'établissement
- Tirer profit si pertinent pour le projet ITI, des nouveaux effets leviers et opportunités



Les résultats de l'évaluation pour l'ITI GeoT

L'ITI GeoT, une excellence confirmée !

L'évaluation à mi-parcours des Instituts thématiques interdisciplinaires (ITI) de l'Université de Strasbourg, le CNRS et l'INSERM s'est tenue de janvier à juillet 2024. L'évaluation écrite et orale réalisée par un jury international de 10 spécialistes en différents domaines incluant des spécialistes de l'interdisciplinarité, de l'innovation pédagogique et de l'articulation recherche-formation, a reconnu l'excellence de la recherche menée au sein de l'ITI GeoT ainsi que la qualité de son parcours de Master et ses ambitions pour les années à venir. De ce fait, l'ITI GeoT fait partie des 12 ITI reconduits sur les 15 labélisés en 2021.

« GeoT est clairement un ITI ayant un impact sociétal élevé, une équipe motivée, une grande visibilité externe et une trajectoire ascendante en termes de recherche collaborative au sein de l'ITI. L'équipe est très forte, elle attire des financements tiers dont l'impact sociétal est incontestable. »

L'ITI GeoT structure un axe de recherche transversal interdisciplinaire de haut niveau à l'Université de Strasbourg avec un périmètre large, à la fois au sein de l'EOST, incluant son observatoire (UAR), son centre de données CDGP et de son unité de recherche (ITES) mais aussi en associant les laboratoires ICUBE (équipe Génie Civil et Énergétique) et LI-SEC/CREM/SAGE (sciences sociales). Organisé en groupes de travail (WG) disciplinaires, l'ITI GeoT a réussi à stimuler les collaborations inter-WG passant de 27% à 83% des projets financés dans le cadre de son appel à projets annuel, ainsi qu'à développer son interdisciplinarité à travers un important effet levier (plus de 3M€ obtenu depuis 2021) de projets nationaux (ANR, PEPR Sous-sol, ...), internationaux (EPOS, Horizon Europe, ...) et industriels.

« Le programme de master est maintenant en cours et s'est avéré très attractif auprès des étudiants étrangers, ce qui témoigne d'un profil international élevé. Le programme est fortement axé sur l'immersion des étudiants dans des environnements de recherche. »

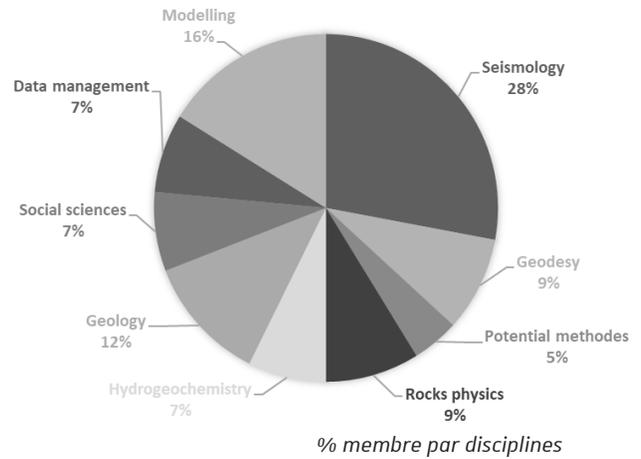
L'ITI GeoT allie recherche de pointe et formation exigeante à la fois internationales et interdisciplinaires. La création d'un parcours complet de master est l'un d'un projet les plus ambitieux entrepris par un ITI. L'ouverture du master en septembre 2023 s'est montrée une initiative fructueuse notamment au niveau international. Nous notons un nombre d'étudiants en croissance entre la première et la deuxième année dont le pourcentage d'étudiants internationaux représentant tous les continents (11 étudiants en 2023 contre 14 en 2024). L'immersion de nos étudiants au niveau M1 et M2 dans nos groupes de recherche a permis d'augmenter le nombre d'étudiants EOST en stage de M2 dans les laboratoires de l'EOST/ITES.

« L'équipe de GeoT a présenté une vision convaincante pour que l'Unistra devienne un acteur de premier plan dans le domaine des géosciences avec la création d'un observatoire de la terre spécifique et la transition d'un ITI financé pour une durée déterminée à une entité de recherche avec une stabilité à long terme. »

L'ITI GeoT travaille déjà sur son après 2028. Après une première moitié de parcours reconnu pour son excellence scientifique (28 publications, 44 présentations en congrès et 2 récompenses), l'ITI GeoT ambitionne de poursuivre ce travail et de devenir un leader sur ces thématiques de recherche et de construire un futur durable en tant que groupe interdisciplinaire autour de la place du sous-sol dans la transition énergétique.

Organisation

68   25% 



7 laboratoires de recherche et observatoire :

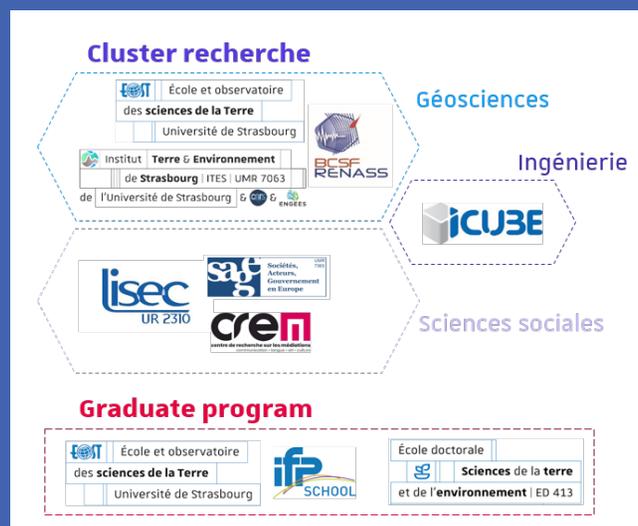
- École et Observatoire des sciences de la Terre (EOST)
- incluant le service national sismologique BCSF-RENASS
- Institut Terre et Environnement (ITES)
- Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICube)
- Laboratoire Interuniversitaire des Sciences de l'Éducation et de la Communication (Lisec)
- Centre de recherche sur les médiations (CREM, Université de Lorraine)
- Sociétés, Acteurs, Gouvernement en Europe (Sage)

2 écoles d'ingénieurs :

- École et Observatoire des sciences de la Terre (EOST)
- IFP School (IFPEN)

1 école doctorale :

- Sciences de la Terre et l'Environnement (ED413)



Gouvernance

L'ITI GeoT est géré par une équipe de scientifiques qui en assure la coordination efficace, la gestion administrative et financière ainsi que le développement stratégique :



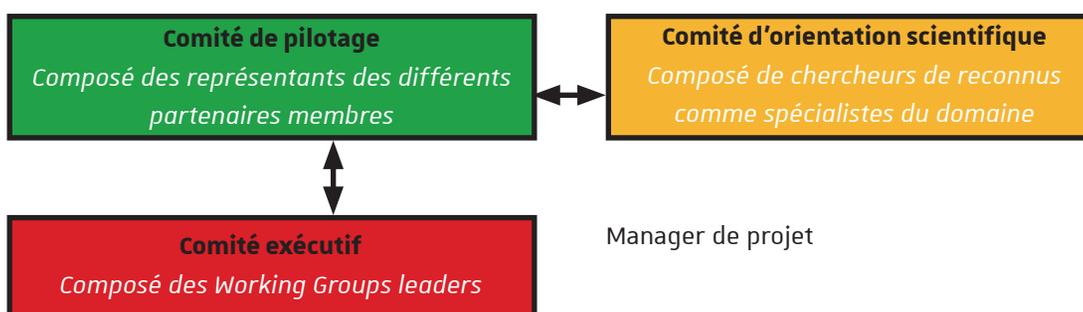
Directeur : Jean Schmittbuhl,
Directeur de recherche CNRS



Directeur adjoint : Patrick Baud,
Professeur Université de Strasbourg



Manager de projet :
Caroline Correia

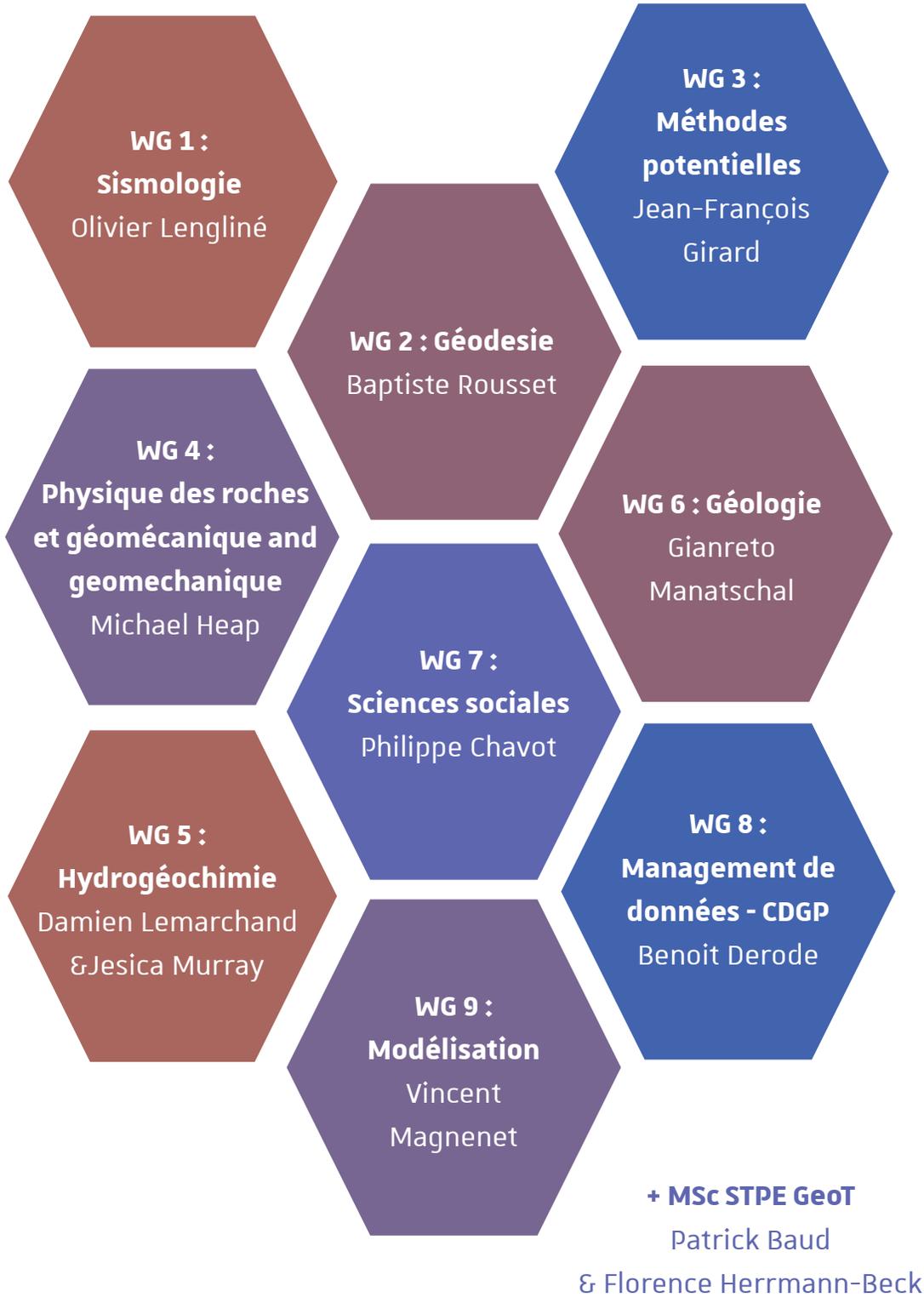


- Comité de pilotage**
- Jean Schmittbuhl - ITI GeoT
 - Patrick Baud - ITI GeoT
 - Jean François Girard - EOST
 - Renaud Toussaint - ITES
 - Fabrice Heitz - Icube
 - Pascal Marquet - Lisec
 - Olivier Lengliné- EOST (école d'ingénieur)
 - Gaetana Quaranta - Master STPE/EOST
 - Damien Lemarchandd - ED413
 - Fédérique Fournier - IFP School
 - Mathilde Adelinet - IFP School

- Comité exécutif**
- Directeur : Jean Schmittbuhl
 - Directeur adjoint : Patrick Baud
 - Manager de projet : Caroline Correia
 - Superviseur formation : Florence Herrmann-Beck
 - Leaders des groupes de travail/recherche :
 - Jérôme Vergne puis Olivier Lengliné
 - Baptiste Rousset
 - Jean-François Girard
 - Micheal Heap
 - Damien Lemarchand et Jesica Murray
 - Gianreto Manatchal
 - Philippe Chavot
 - Marc Schaming puis Benoit Derode
 - Vincent Magnenet

- Comité d'orientation scientifique**
- Président :
 - Frédéric Cappa (Univ Côte d'Azur)
 - Membres :
 - Jérôme Vergne (OVSM-IPGP)
 - Tomas Fischer (CUNI)
 - Emmanuelle Klein (INERIS)
 - Bernard Sanjuan (BRGM)
 - Chrystel Dezayes (BRGM)
 - Beata Orleka-Sikora (IG PAS)
 - Virginie Harcouët-Menou (VITO)
 - Emmanuel Gaucher (KIT)
 - Carine Heitz (Enges)
 - Stéphane Garambois (UGA)

Working group



Projets de recherche internes

L'ITI GeoT accompagne les multiples projets de recherche portés par ses membres. À cette fin, il attribue à chaque groupe de travail un financement récurrent annuel, complété par des financements dédiés, accordés dans le cadre d'une période annuelle d'appels à projets.

Ces dispositifs financiers ont permis à l'ITI GeoT de soutenir un grand nombre d'expérimentations et de générer des résultats de grande envergure, contribuant ainsi à l'avancée des recherches dans les domaines liés aux géosciences pour la transition énergétique.

Lauréats de l'Appel à projets 2023			
WG3	J. Hinderer	Hybrid gravity applied to the monitoring of the Theistareykir geothermal reservoir	21 500€
WG4	M. Heap	Mechanical behaviour and permeability of porous volcanic geothermal reservoir rock	23 000€
WG4	P. Baud	Influence of the intermediate principal stress on inelastic compaction and compaction localization in porous sandstone	11 000€
WG5/9	D. Lemarchand & J. Murray	HT-HP experimental approach for native hydrogen generation by CO2 injection in granitic geothermal reservoir	36 000€
WG6	G. Bozetti	Temporal and Spatial Evolution of the Lower Triassic Buntsandstein Formation	38 000€
WG9/1	J. Schmittbuhl	Coupling between pressure and opening during fluid migration along a fault – implication for remote induced seismicity triggering	10 000€
+ 2 bourses de thèses			
WG5/9		Anna Wallentin	
WG6		Gabriela Knoblock	

Lauréats de l'Appel à projets 2024			
WG1/9	O. Lengliné	To better understand the link between the induced seismicity and the development of the aseismic slip on a fault plane.	24 000€
WG2/8	B. Rousset	GNSS network installation	15 000€
WG3	J. Hinderer	Hybrid gravity applied to the monitoring of the Theistareykir geothermal reservoir	24 500€
WG4/6	P. Baud & M. Schuster	Toward intermediate reservoirs appraisal in the Upper Rhine Graben: Petrophysical and mechanical characterization of the Grande Oolithe (Dogger) in the Rhine Graben	36 000€
WG4/3	M. Heap	The influence of pressure and temperature on the electrical conductivity of geothermal reservoir rocks from Soultz-sous-Forêts (France)	8 500€
WG5/9	D. Lamarchand & J. Murray	H2 generation and stimulation with CO2 in granitic geothermal reservoirs of the Upper Rhine Graben	22 000€
+ 1,5 bourses de thèse			
WG1/9		Kamal Ahmadov	
WG7		Morgane Platon	

Analyse rétrospective de l'ensemble de la séquence sismique autour de Strasbourg

Une étude approfondie de l'ensemble de la sismicité qui s'est produite entre 2018 et 2023 autour de la boucle géothermique de Vendenheim a été réalisée. Ce travail a permis une meilleure détection et localisation des petits séismes induits au cours de cette période. Les résultats obtenus indiquent que la sismicité générée au cours de ces injections se concentrent autour des quelques structures principales. En particulier une même structure est à l'origine des 3 événements les plus importants.

Cette étude a également permis d'analyser l'apport des capteurs RaspberryShake installés dans l'Eurométropole au moment de cette crise sismique pour l'analyse de la sismicité. On peut ainsi montrer que ces capteurs sont un bon complément de capteurs sismologiques plus traditionnels installés dans des zones moins bruitées et viennent ainsi améliorer notre capacité de détection et de précision de localisation dans ce contexte urbain.

Analyse de la sismicité du site de Balmat (Belgique)

En collaboration avec l'INERIS et l'institut de recherche VITO de Belgique, l'analyse de la sismicité du site géothermique a débuté. Il s'agit ici de produire un catalogue de sismicité de haute résolution associé à la phase de production sur ce site géothermique entre 2021 et 2022.

Sismicité post-injection

Dans le cadre du projet DT-GEO, un analyse multi-épisodes de la sismicité post-injection est en cours. En effet, il apparaît que souvent que dans le cadre stimulations de réservoirs géothermiques, les séismes avec les plus fortes magnitudes ne se produisent pas directement pendant la période d'injection mais dans les jours (ou des fois mois) qui suivent cette injection. La compréhension de l'évolution

de la sismicité à la fin de l'injection est donc primordiale pour comprendre la survenue de ces magnitudes plus importantes.

Développements instrumentaux

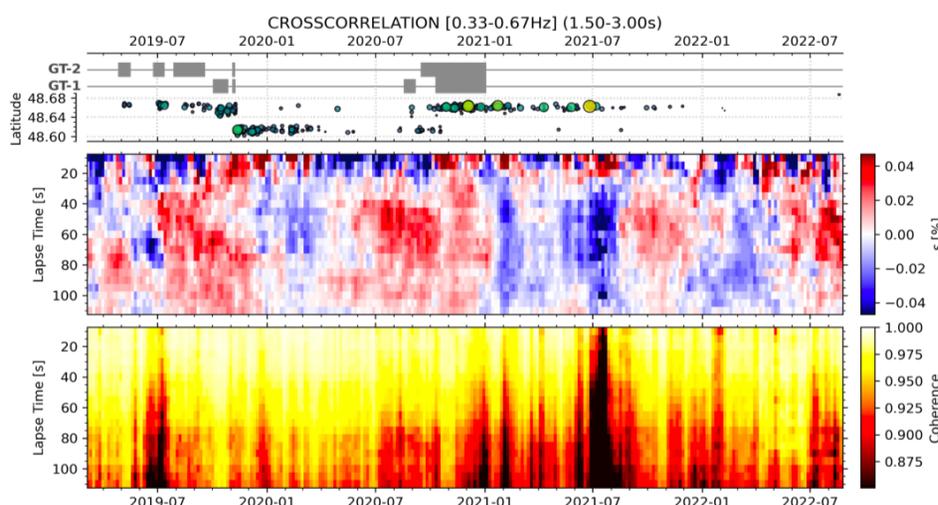
Des développements instrumentaux sont en cours avec des tests de mesure sur fibre optique. Une première phase de mesure DAS (distributed acoustic sensing) entre le campus central et le campus d'Illkirch s'est révélée prometteuse et a démontré la richesse des signaux à exploiter et l'intérêt que cette méthode peut avoir pour le suivi et la surveillance de la sismicité des réservoirs géothermiques.

De plus le capteur fond de puits de Soultz va bénéficier d'une jouvence et être réinstallé dans un nouveau puits ce qui permettra d'obtenir des signaux de qualité à proximité immédiate du réservoir.

Suivi de la déformation des réservoirs géothermiques profonds par interférométrie de bruit sismique ambiant

La mesure du bruit sismique ambiant, quand il est corrélé entre deux stations sismologiques proches, a le potentiel de révéler les propriétés élastiques du sous-sol entre ces 2 capteurs. En répétant cette opération au cours du temps, on peut donc effectuer un suivi de l'évolution des propriétés du sous-sol au cours du temps et voir comment ces propriétés sont influencées par des perturbations appliquées au réservoir. Des mesures directes utilisant cette méthode ont été effectuées autour du réservoir géothermique de Vendenheim et montrent l'évolution des propriétés du réservoir enregistré en fonction des injections successives qui ont eu lieu.

Sur cette même problématique nous développons également des modèles numériques capable de prédire l'évolution des propriétés élastiques du réservoir géothermique en fonction des perturbations qui lui sont imposées.



Évolution de la variation de vitesse des ondes sismiques à partir du bruit sismique.
Thèse de Flavien Mattern

WG2 : Géodésie

Durant les deux dernières années, le groupe de travail Géodésie de l'ITI s'est concentré sur l'installation de capteurs géodésiques dans le cadre de deux projets.

Tout d'abord, suite à la crise sismique de 2019-2020 à La Wantzenau, qui a déclenché d'importants essaims sismiques sur la faille de la Robertsau, nous avons mis en place un réseau de stations GNSS permanentes afin de surveiller d'éventuelles déformations liées au glissement le long de cette faille. La première étape a consisté à identifier des sites d'installation potentiels sur des images satellites et sur le terrain. Nous avons finalement opté pour des installations sur des toits de bâtiments publics en béton, garantissant ainsi la stabilité et la sécurité des capteurs. Quatre sites ont été retenus : à Illkirch, Hoenheim, La Wantzenau et Hoerdt (Photographie). La mise en service de ces stations s'est étalée entre novembre 2023 et avril 2024. Depuis leur activation, elles transmettent en temps réel les données de position à l'ITES, que nous sommes en train d'analyser.

Par ailleurs, le deuxième projet du groupe se situe dans le Nord de l'Alsace, en lien avec les activités de géothermie profonde à Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen. Électricité de Strasbourg prévoit en effet de stimuler un nouveau puits à proximité de celui déjà en fonctionnement dans les prochains mois. Afin de caractériser les déformations potentielles liées aux mouvements d'eau ou à des glissements asismiques en profondeur, nous densifions le réseau géodésique dans cette région. Une station GNSS a déjà été installée à Soultz-sous-Forêts et nous sommes en discussion pour en installer deux à Betschdorf. De plus, trois inclinomètres à longue ligne de base (Photographie) sont en cours d'installation dans le fort de Schoenenbourg, un ancien ouvrage de la ligne Maginot reconverti en musée, situé à 30 mètres de profondeur. Ces longs tunnels horizontaux permettent d'installer des inclinomètres de très haute précision. Grâce aux fibres optiques de plusieurs kilomètres reliant les inclinomètres, nous pourrions également réaliser des mesures de "distributed acoustic sensing" pour détecter d'éventuels tremblements de terre.



Ci-dessus : à droite, une station GNSS installée à Hoerdt et à gauche, photo du tunnel du fort de Schoenenbourg où sera installé les inclinomètres longue ligne de base

WG3 : Méthodes potentielles

Sur l'aspect électromagnétisme :

Nous avons développé un parc d'appareils mobiles pour la réalisation de mesures galvaniques du champ électrique dans une gamme <2 kHz qui permet l'imagerie profonde (jusqu'à plusieurs kilomètres). Pour cela, nous avons adapté des « nodes sismiques » commerciaux pour ces mesures électriques. Ce parc de 20 stations 2 voies s'ajoute aux 6 stations magnéto-telluriques du parc EMMOB qui permettent la réalisation de mesures magnétiques et électrique sur une large gamme de fréquence. Ce parc instrumental est complété par un émetteur puissant et basse fréquence pour des applications à l'imagerie (dite CSEM) allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres de profondeur.

Nous collaborons dans le cadre de l'étude du socle sous couverture sédimentaire, tel que rencontré dans le fossé rhénan, pour la mise au point d'algorithmes d'imagerie combinant divers dispositifs de mesures. L'apport complémentaire de l'imagerie sismique, alliant une meilleure résolution et une sensibilité à d'autres propriétés physiques, ouvre la perspective d'une meilleure résolution et interprétation pour répondre à diverses questions sur les circula-

tions fluides actuelles et passées (altérations hydrothermales).

Enfin, nous réalisons l'échelle de quelques dizaines de mètres de profondeur, l'étude de sites dits analogues de cibles profondes (> 1 km de profondeur) qui permettent un meilleur contrôle de la cible, mais aussi une meilleure compréhension des phénomènes ayant affecté ces roches (parallèle avec les gisements uranifères au Canada qui sont des sites hydrothermaux fossiles par ex., ou encore les aquifères en zone granitiques affleurant dans les vosges comme celui suivi par l'OHGE). Dans ce dernier cas, Blandine Chotard a réalisé son stage de Master 2 GeoT soutenu en juin 2024, sur le traitement et l'interprétation d'un profil CSEM réalisé sur le bassin versant du Strengbach.

Sur l'aspect gravimétrie :

L'énergie géothermique représente environ 30 % de la production électrique en Islande avec un total de 755 MWe produits. En particulier, la centrale géothermique de Theistareykir située sur la dorsale médio-atlantique au Nord de l'Islande produit 90 MWe à l'aide de deux turbines mises en service en automne 2017 et printemps 2018. Le projet consiste en un suivi d'un réservoir géothermique par gravimétrie hybride combinant différents types de gravimètres (gravimètre permanent supraconducteur, gravimètre absolu balistique et micro-gravimètres) afin d'obtenir sur un réseau de répétition une information spatiale et temporelle sur les variations de pesanteur en surface associées au fonctionnement naturel et anthropique du réservoir. Cette méthodologie est appliquée depuis 2017 au site volcano-géothermique de Theistareykir en Islande. Le but principal de ces études est de faire un bilan de la redistribu-

tion des masses d'eau circulant en profondeur (charge/décharge du réservoir) et ainsi d'estimer la durabilité du site géothermique par la comparaison des mesures de gravité de surface aux paramètres d'exploitation de la centrale (débits d'injection et de production).

Retrouvez quelques résultats des campagnes 2023 et 2024 à la page suivante :

Résultats préliminaires issus des campagnes de mesures en 2023 et 2024

Les répétitions en 2023 et 2024 du réseau micro-gravimétrique par rapport à la campagne initiale de 2017 conduit aux résultats de la figure 1 ci-dessous.

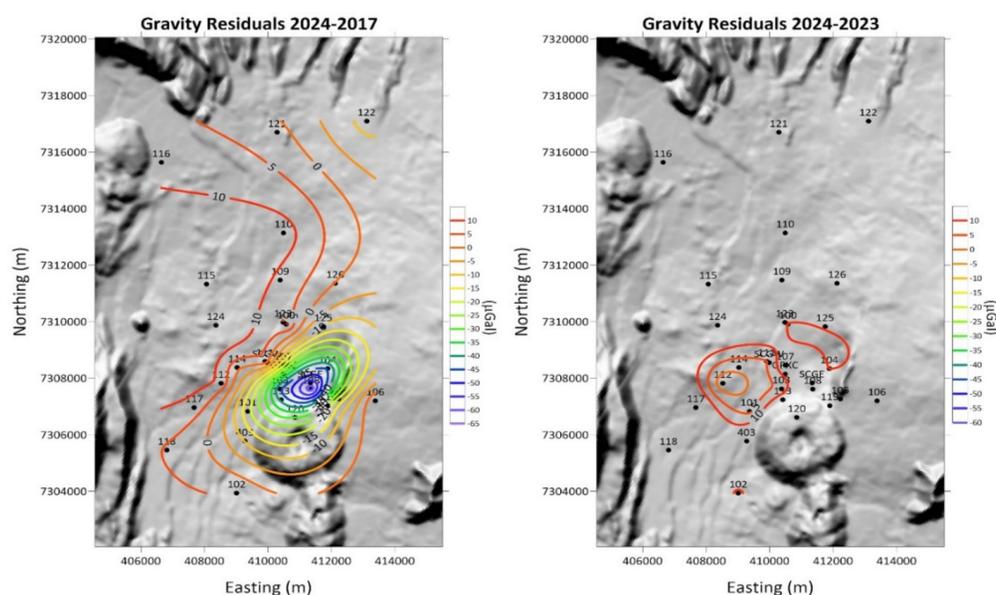


Figure 1. (gauche) Variations temporelles de gravité (2024-2017) sur le réseau de Theistareykir ; (droite) Variations temporelles de gravité (2024-2023)

Le principal résultat est une diminution générale de gravité dans la zone de production (vers l'Est) entre 2017 et 2024 à un taux comparable de ce qui avait déjà été observé (Portier et al. 2022). Par contre, il est à noter un changement de tendance entre 2024 et 2023 lié à une intrusion de magma (Gudnason et al., EGU2024). Le phénomène d'inflation du sol est aussi visible sur la fig.3 ci-dessous.

Le deuxième résultat vient des mesures de gravimétrie absolue faite en 2023 et 2024 dans les stations permanentes (les deux gravimètres supraconducteurs SCGE (extraction) et SCGW (injection) (cf. fig. 2). Il est très clair que la gravité

continue de décroître à la station de production (SCGE) et d'augmenter à la station d'injection (SCGW) mais à des taux différents.

L'impact des corrections de déplacement vertical (mesures InSAR) (cf.fig. 3) en 2023 et 2024 est notable.

La comparaison des mesures de gravité avec les données d'exploitation de la centrale (injection et extraction) montrent très clairement une recharge partielle du réservoir géothermique de Theistareykir suggèrent une exploitation durable de ce site.

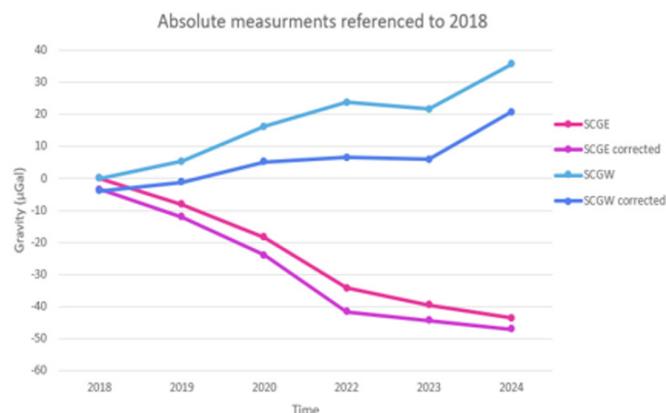


Figure 2. Variations de gravité absolue à Theistareykir de 2018 à 2024

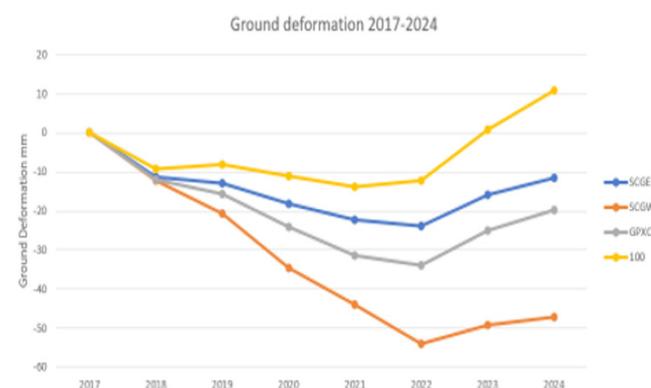


Figure 3. Déformation du sol (2017 -2024) à partir des mesures InSAR.

WG4 : Physique des roches

Le groupe de travail Rock physics and Geomechanics (WG4) a publié dix articles dans des revues internationales à comité de lecture en 2023 et 2024 : un en 2023 et neuf en 2024. L'article publié en 2023 (Kushnir et al., 2023) portait sur la réactivation de joints scellés de manière variable dans des roches réservoirs de Soultz-sous-Forêts (France). Ces travaux ont montré que les fissures partiellement scellées sont des cibles idéales pour la stimulation, car elles agissent comme des plans de faiblesse au sein de la masse rocheuse et leur réactivation peut entraîner des augmentations significatives de la perméabilité. Cependant, les données de laboratoire ont également montré que les fissures bien scellées peuvent augmenter la résistance de la roche localement et ne jamais se réactiver pendant la stimulation, ce qui en fait de mauvaises cibles pour l'amélioration de la perméabilité.

Le groupe de travail « Physique des roches et géomécanique » a publié neuf articles en 2024.

Xue et al. (2024) ont montré, à l'aide de la corrélation d'images numériques, comment le pH peut influencer l'initiation et la croissance des fissures dans le grès.

Bischoff et al. (2024) ont exploré le potentiel géothermique des zones de cisaillement hydrothermalement altérées dans les roches cristallines. Cette étude a montré que les zones de cisaillement altérées par l'hydrothermie sont prometteuses en tant que réservoirs géothermiques profonds, ce qui améliore considérablement notre capacité à identifier et à exploiter des zones perméables prolifiques dans des contextes cristallins profonds à l'échelle mondiale, apportant ainsi une contribution substantielle à la transition en cours vers des ressources énergétiques plus propres.

Griffiths et al. (2024) ont montré, à l'aide d'une approche multi-méthodes, que le fait qu'une roche volcanique subisse ou non une microfissuration thermique pendant le chauffage et/ou le refroidissement dépend des attributs microstructuraux de la roche.

Heap et al. (2024a) ont montré comment la température peut influencer les propriétés thermiques des roches. Ces auteurs ont constaté que les calculs de transfert de chaleur à travers des roches volcaniques partiellement vitreuses

ne doivent pas tenir compte d'une conductivité thermique dépendant de la température, mais qu'il faut s'attendre à des diminutions et à des augmentations de la conductivité thermique avec la température pour les roches volcaniques entièrement cristallisées ou dévitrifiées et les roches volcaniques entièrement vitreuses, respectivement.

Heap et al. (2024b) ont montré comment la perméabilité du tuff du réservoir géothermique du volcan Krafla évolue en fonction de la pression et de la contrainte, des données expérimentales qui soulignent l'importance de la microstructure initiale sur l'évolution de la perméabilité dans les roches volcaniques.

Villeneuve et al. (2024) ont fourni des relations physiques et mécaniques de profondeur pour les roches du réservoir géothermique de Rotokawa dans la zone volcanique de Taupō (Nouvelle-Zélande).

Bofill et al. (2024), dans un article commun entre le groupe de travail sur la physique des roches et la géomécanique (WG4) et le groupe de travail sur la géologie (WG6), ont étudié l'influence des processus sédimentaires sur les architectures des réservoirs, en montrant qu'elle peut être considérée comme essentielle pour améliorer la prédiction de l'hétérogénéité de la perméabilité.

Noël et al. (2024) ont montré que la résistance à la compression uniaxiale et la ténacité à la rupture des roches carbonatées sont réduites en présence d'eau.

Enfin, Carbillet et al. (2024) ont étudié l'influence des micro et macrofissures sur la perméabilité du granite. Les résultats de cette étude ont montré que la perméabilité du granite microfissuré évolue différemment de celle du granite intact pendant la déformation avant rupture dans le régime fragile, et que ces résultats ont des implications importantes pour l'écoulement des fluides dans les systèmes de failles crustales et leur potentiel pour l'exploitation de l'énergie géothermique.

WG5 : Hydrogéochimie

Le groupe de travail sur l'hydrogéochimie est impliqué dans de nombreux projets de grande envergure, tels que PEPR sous-sol PC9 et ANR AlterAction. Par ailleurs, depuis 2024, le WG5 fait partie d'un groupe local consacré à la recherche sur l'Hydrogène dans toutes ces formes.

En juin 2024 : le groupe a organisé la journée H2-UNISTRA « Journée Plénière de l'Hydrogène à l'Université de Strasbourg, Université de Strasbourg, France »

de plus, depuis octobre 2023, A. Wallentin, une doctorante financée par l'ITI GeoT, travaille depuis sur des expériences de laboratoire et des modélisations géochimiques visant à simuler l'altération eau-roche pour mieux comprendre la possibilité de produire de l'H₂ natif sur le site de Soultz-sous-Forêts. Pour comprendre les conditions de la réaction d'oxydoréduction qui produit l'H₂ natif dans les granites [1], des expériences dans des capsules d'or sont menées à l'ITES [2]. Pour stimuler la réaction et voir l'influence de la pression du CO₂ sur le système, des expériences d'injection de CO₂ sont mises en place en collaboration avec le Fraunhofer Institut de Bochum, en Allemagne. Enfin, l'H₂ étant très volatile, nous rechercherons les traces d'une source active dans le Fossé Rhénan en menant des campagnes de mesure de l'H₂ à la surface, en collaboration avec la société Terrensis.

En décembre 2024 : l'ITI GeoT a financé un nouveau chromatographe en phase gazeuse pour l'analyse des gaz inorganiques (Agilent micro-GC 990).

Le groupe de travail sur l'hydrogéochimie utilise la traçabilité isotopique, les expériences d'interaction eau-roche-gaz et la modélisation géochimique pour étudier le transfert de matière dans les systèmes géothermiques. Les principaux objectifs sont d'améliorer la compréhension de la géochimie des fluides et de la minéralogie des réservoirs géothermiques, contribuant ainsi à une exploration et une exploitation durables.

Dans le contexte de la transition énergétique, le groupe vise à approfondir sa compréhension des systèmes géothermiques non seulement en tant que source de chaleur, mais aussi en tant qu'origine et moyen de mobilité des éléments clés soutenant la décarbonisation de la matrice énergétique, tels que l'hydrogène naturel, le lithium et les éléments critiques. Au cours des prochaines années, les efforts de recherche se concentreront sur l'amélioration des connaissances dans ces domaines afin de contribuer à des solutions énergétiques plus propres et plus efficaces.



Photo de la Journée H2-Unistra, Juin 2024. L'événement a été organisé et en partie financé par l'ITI GeoT

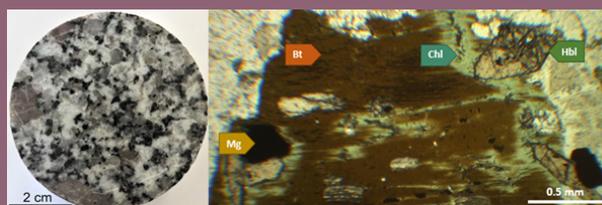


Figure 1. Photographie d'une carotte de granite de Soultz-sous-Forêts et d'une lamelle riche en minéraux ferreux capables de produire du H₂ (biotite (Bt), magnétite (Mg), chlorite (ChL) et hornblende (Hbl)).

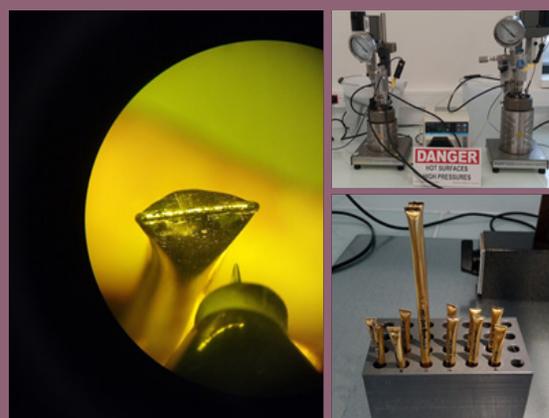


Figure 2. Capsules d'or remplies de biotite pure soudée et réacteurs Parr 5500 pour les expériences à haute température et à haute pression

WG6 : Géologie

Le WG6 Géologie est composé de quatre équipes.

La première équipe, dirigée par Guilherme Bozetti, travaille sur l'analyse architecturale du groupe du Buntsandstein en utilisant une approche sédimentologique/stratigraphique. L'objectif principal est de comprendre le contrôle des faciès et des environnements de dépôt sur les propriétés hydrauliques du réservoir du Buntsandstein. Cette étude a été soutenue financièrement par l'ITI GeoT et implique deux doctorants (Lucas Bofill, qui a terminé sa thèse à l'automne 2024 et Gabriela Knobelock, qui terminera sa thèse en juillet 2026) et des collaborations avec des chercheurs et hydrologues nationaux et internationaux. Une deuxième équipe, dirigée par Mathieu Schuster, travaille sur les géo-réservoirs intermédiaires dans le Fossé rhénan supérieur, avec un accent particulier sur la caractérisation multidisciplinaire et multi-sources de la formation « Grande Oolithe » du Jurassique moyen, en collaboration avec WG4 (physique des roches et géomécanique).

Les deux autres équipes, travaillant sur le contrôle de la croûte inférieure sur le flux de chaleur et sur l'utilisation des roches du manteau dans la transition énergétique, n'ont pas reçu de financement de l'ITI GeoT pour la période 2023-24 et par conséquent, seuls les résultats des deux premières équipes sont résumés.

En 2023-24, le projet Buntsandstein a initié deux nouvelles collaborations majeures. La première implique une collaboration plus formalisée avec l'Université fédérale de Rio Grande do Sul (UFRGS) permettant de faciliter l'interaction avec les enseignants et les étudiants. Une deuxième nouvelle collaboration a été établie avec l'Université de Poitiers, impliquant la co-supervision d'un étudiant en doctorat sponsorisé par le PEPR SousSol et ESGéothermie. Ceci per-

mettra d'étudier et de mieux comprendre l'évolution des dépôts argileux (en particulier les argiles diagénétiques) dans les différentes formations du groupe du Buntsandstein, en se concentrant non seulement sur les différents intervalles stratigraphiques, mais aussi sur les différents faciès et associations de faciès. En ce qui concerne les doctorats, Gabriela Knobelock poursuivra son étude du grès vosgien inférieur et détaillera la formation sous-jacente du grès vosgien supérieur et son contact avec le conglomérat principal. Cette étude fait suite au doctorat de Lucas Bofill, qui a été soutenu avec succès à l'automne 2024. En juin 2024, le projet a été présenté par Bozetti et Knobelock lors de la réunion annuelle de l'Association internationale des sédimentologues, à Aberdeen, au Royaume-Uni, où une section entière était consacrée aux dépôts continentaux triasiques.

En 2023-24, le projet 'Grande Oolithe', dirigé par P. Baud (WG4) et M. Schuster (WG6), incluait la supervision d'Alexis Aparicio, stagiaire du Master2 ITI GeoT (2024). Le mémoire de Master, intitulé « Multi-scale geological characterization of the "Grande Oolithe" carbonates in the Upper Rhine Graben (URG) » visait à définir l'état de nos connaissances concernant la Grande Oolithe dans le périmètre de l'URG, et à proposer des comparaisons initiales avec la Grande Oolithe des bassins environnants. Les travaux ultérieurs ont également consisté en un premier examen, une documentation et un échantillonnage du forage de Chalampé réalisé par le MDPA dans les années 1980 et conservé à la Géothèque du BRGM. Ces travaux ont été réalisés en vue d'une étude détaillée de la Grande Oolithe traversée par ce forage, qui doit servir de coupe de référence pour la Grande Oolithe en sub-surface dans le périmètre du Fossé rhénan supérieur.



Ci-dessus : à gauche, une photographie prise sur le terrain dans le cadre du projet Buntsandstein. À droite, une image d'une carotte issue du puits de Chalampé (base BRGM), illustrant la traversée complète de la Grande Oolithe.

WG7 : Sciences sociales

En 2023-2024, le groupe de travail en sciences sociales (WG7) a poursuivi ses projets relatifs aux sciences participatives : PrÉSENCE (ANR) et Sismocité (Idex-Unistra). Le projet ciblé « Bassin Rhénan » du Programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) « Sous-sol bien commun » a également démarré.

PrÉSENCE et SismoCité ont permis d'étendre et de densifier le réseau sismocitoyen en installant 72 capteurs sismiques chez des volontaires résidant en Alsace du nord et dans l'Eurométropole de Strasbourg. Comme pour les déploiements précédents, le WG7 a organisé une série d'entretiens avec un panel de 30 volontaires autour de plusieurs objectifs : analyser leurs perceptions du risque sismique, de l'activité scientifique et de la science en général ; mettre en rapport ces perceptions avec les motifs qui les ont conduits à s'engager dans une recherche participative.

L'analyse en cours permettra de répondre aux questions suivantes. L'existence de projets de géothermie profonde sur ces deux nouvelles zones de déploiement de capteurs a-t-elle une incidence sur la perception du risque sismique ? Le dispositif de science participative favorise-t-il l'acculturation à la sismologie ? Cette initiative donne-t-elle aux publics la capacité d'interagir avec la communauté scientifique, voire avec d'autres parties prenantes du développement de la géothermie profonde ? L'action menée dans le cadre du projet SismoCité vise précisément à enquêter sur l'opportunité de mettre en place une concertation concernant la surveillance sismique des projets industriels qui engagerait les scientifiques, les autorités locales, les élus et les associations. Une trentaine d'entretiens auprès d'élus et de représentants d'associations a été organisée à cette fin.

Le WG 7 coordonne l'axe sciences sociales du projet ciblé Bassin Rhénan du PEPR sous-sol. Cet axe, intitulé De l'acceptabilité à la recherche et l'innovation responsable intègre trois workpackages. Le premier analyse les représentations publiques des usages du sous-sol relatifs aux projets de géothermie alsaciens qui sont véhiculées par la presse (nationale, alsacienne, pure player). Dans les faits, il s'agit d'identifier les récits concernant la géothermie profonde (portés par les industriels, les politiques, les associations...) mobilisés par la presse et les médias sociaux, notamment lors de controverses et de consultations. À ce titre, un article publié en 2023 se focalise sur les récits portant sur l'acceptabilité sociale de la géothermie profonde en Alsace à deux moments clés : les enquêtes publiques menées au

sein de l'Eurométropole de Strasbourg en 2015 et la crise sismique de 2019-2021. Un deuxième axe d'analyse en cours s'intéresse aux reconfigurations journalistiques induites par la crise sismique de 2019-2021 et à l'émergence de projets d'extraction de lithium géothermal en Alsace du Nord. L'objectif est d'examiner si les journalistes – via les sources qu'ils mobilisent – tirent des enseignements des controverses passées, et si les récits actuels prennent davantage en compte les paroles citoyennes par rapport aux périodes antérieures.

Le second workpackage entend prolonger les travaux menés dans le cadre des projets PrÉSENCE et SismoCité. Une thèse débutée en novembre 2024 analyse les dispositifs de consultation et de concertation qui accompagnent la mise en place de projets d'extraction de lithium : débats organisés par la Commission nationale du débat public, enquêtes publiques organisées en territoire, mise en place de comités de suivi de site, principalement. Plusieurs terrains d'étude sont envisagés, notamment le projet de mine de l'Allier (projet Emili) et les projets alsaciens d'extraction du lithium géothermal. L'objectif de ce travail est de comprendre le rôle joué par l'évolution du code minier dans les transformations des formes d'expression de l'engagement citoyen et leur prise en compte dans la gouvernance des projets.

Le troisième workpackage rend compte de l'évolution des rapports qui se tissent entre pouvoirs publics, communauté scientifique et monde de l'industrie dans le cadre du renouveau minier et leurs incidences sur les projets de géothermie profonde. En 2024, le WG7 a rédigé un texte de synthèse portant sur les évolutions des cadres politiques et les requalifications successives des projets de géothermie profonde (de la production de chaleur à l'extraction de lithium). Cette synthèse inclue également des travaux menés en sciences sociales. En lien avec cette approche, une thèse débutée en septembre 2024 prend pour terrain les projets d'extraction de lithium géothermal qui voient le jour en Alsace du nord. L'objectif est de suivre l'évolution du discours des parties prenantes de projets (industriels, préfecture, scientifiques, principalement) en les rapportant aux évolutions de la politique de la mine et du code minier, ainsi qu'aux évènements qui ont marqué les développements de la géothermie alsacienne.

WG8 : Management de données (CDGP)

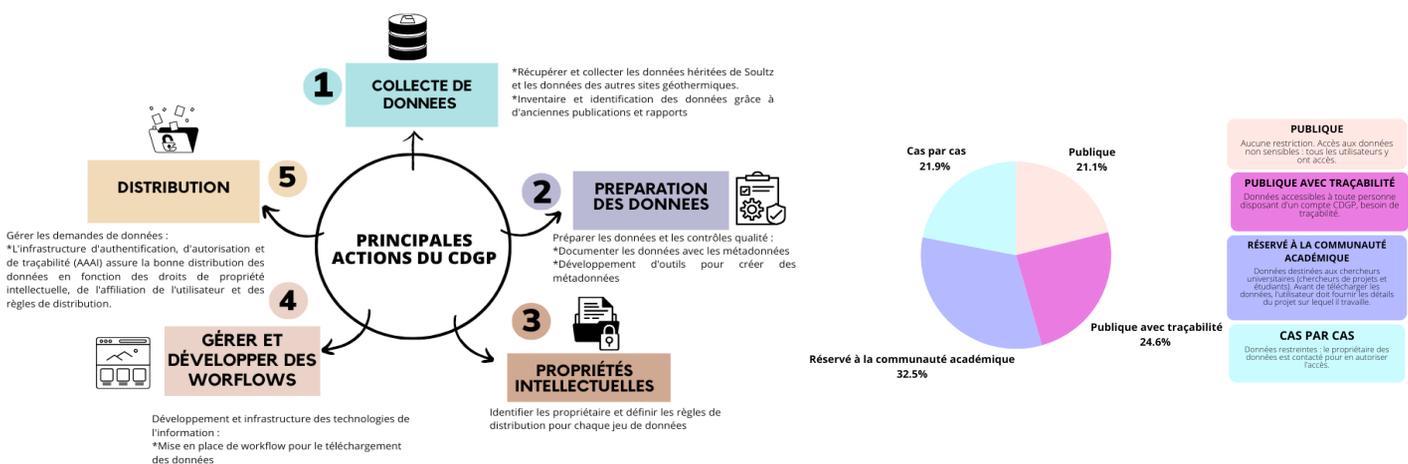
Le WG8 a pour but de collecter, d'archiver et de distribuer les données des sites géothermiques en Alsace dans son centre de données le CDGP. Ces dernières sont diffusées sur la plate-forme Centre de Données de Géothermie Profonde (CDGP). Dans le cadre du projet européen Geo-INQUIRE, le CDGP a œuvré pour ajouter différents types de données. Plusieurs produits du visualiseur de cartes GeORG (Geopotentials of the Deep Upper Rhine Graben, https://www.geopotenziiale.org/home/index_html) autour des sites géothermiques en Alsace (Soutz-sous-Forêts, Vendenheim, Rittershoffen) ont été extraits et publiés sur le site du CDGP. Dans le cadre de la thèse de Kamel Drif intitulée « Développement d'outils de suivi et de prédiction de la sismicité induite par l'injection de fluides dans des réservoirs géothermiques profonds fracturés (EGS) » (<https://doi.org/10.1029/2023JB028190>), 18 catalogues de sismicité relatifs à différents épisodes (1993, 1995, 1996, 2000, 2003, 2004, 2005, 2010) sur le site géothermique de Soutz-sous-Forêts ont été ajoutés. Un autre catalogue lié au site géothermique de Vendenheim, réalisé dans le cadre de la publication de Fiori et al. (2023) « Monitoring induced microseismicity in an urban context using very small seismic arrays: The case study of the Vendenheim EGS project » (<https://doi.org/10.1190/geo2022-0620.1>), a également été intégré.

Enfin, pour la première fois, un catalogue portant sur les propriétés pétrophysiques du site de Soutz-sous-Forêts, fourni par Mike Heap, est désormais disponible sur le CDGP.

Le Centre de Données de Géothermie Profonde (CDGP) s'engage dans une transformation stratégique visant à moderniser ses outils et à optimiser la gestion des données géothermiques en Alsace. Pour atteindre ces objectifs, un développeur logiciel a récemment été recruté afin de mettre à jour l'infrastructure d'authentification tout en garantissant une conformité stricte aux règles de distribution définies par les fournisseurs de données. Cette initiative marque une étape clé dans la conception d'une nouvelle plateforme web, intégrant des fonctionnalités avancées pour mieux servir la communauté scientifique, industrielle et le grand public.

Dans le cadre de notre vision de développement, nous renforçons également nos efforts de collaboration avec les groupes de travail dédiés. En partenariat avec le WG9 Modélisation, nous prévoyons d'intégrer des modèles géologiques 3D, enrichissant ainsi les données disponibles sur les sites géothermiques. Par ailleurs, notre engagement envers une approche pluridisciplinaire se concrétise par une collaboration avec le WG7 Sciences sociales, permettant d'intégrer des données pertinentes pour une compréhension globale des interactions entre la géothermie et les sociétés.

En savoir plus, <https://cdgp.u-strasbg.fr/index.html#>



WG9 : Modélisation

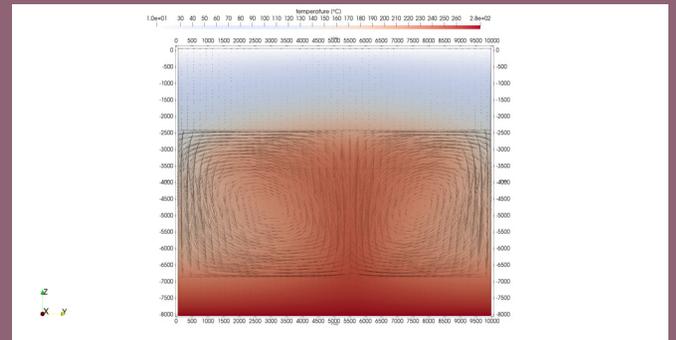
Le WG9 a progressé dans les 3 axes qu'il conduit en parallèle.

- Pour la modélisation numérique : Javier ABREU TORRES, en collaboration avec le GFZ de Potsdam (Guido BLÖCHER et Mauro CACACE) et sous la direction de Jean SCHMITTBUHL, a finalisé le développement d'un modèle numérique 3D pour le site de Strasbourg-Vendenheim, à l'aide du code de calcul MOOSE. Grâce à ce modèle, une explication pertinente de la distance de plusieurs kilomètres entre les foyers sismiques et les puits d'injection a pu être formulée pour la première fois. De son côté, Yunliang WANG a continué ses modèles numériques visant à surveiller la déformation des réservoirs géothermaux par interférométrie de coda (codes de calcul Code_Aster et SpecFEM).

- Pour la modélisation analytique : Vincent MAGNET a abouti à une première version du code GEOSOL (Geometric Solver), développé en interne à ICUBE (langage Ada). Ce code permet entre autre d'obtenir des solutions approchées aux équations TTHM (thermo-hydro-mécanique à deux températures) gouvernant l'évolution des réservoirs géothermaux. Pour valider cette nouvelle approche mêlant méthodes de Ritz et géométrie différentielle, un modèle simplifié du site de Soultz-sous-Forêts a été créé avec succès. Ce modèle reproduit les principaux observables (logs de température et de contraintes).

- Pour la modélisation analogique : Jian LIN, Violaine TINARD et Pierre PFEIFFER

Une première campagne de mesures (DAS Febus) a été menée sur deux dispositifs expérimentaux différents : une poutre métallique enrobée de mortier et un tube métallique enrobé de mortier de longueur 1 m. Dans le premier cas (poutre), des essais à fréquences contrôlées (de 1 à 12 Hz) ont été réalisés et les données DAS ont été confrontées aux résultats obtenus via d'autres capteurs (FBG et laser) : la faisabilité de réaliser des mesures localisées avec le DAS à grande distance (de l'ordre de la dizaine de km) a été montrée. Dans le second cas (tube), des essais sous sollicitations statiques et dynamiques à l'aide de trois méthodes de mesure (DAS, FBG et interférométrie) ont permis de mettre en évidence l'influence de la géométrie de la bobine de fibre sur la réponse en déformation du système ainsi que l'impact des matériaux utilisés (acier, mortier) sur la transmission du signal.



Exemple graphique du modèle numérique

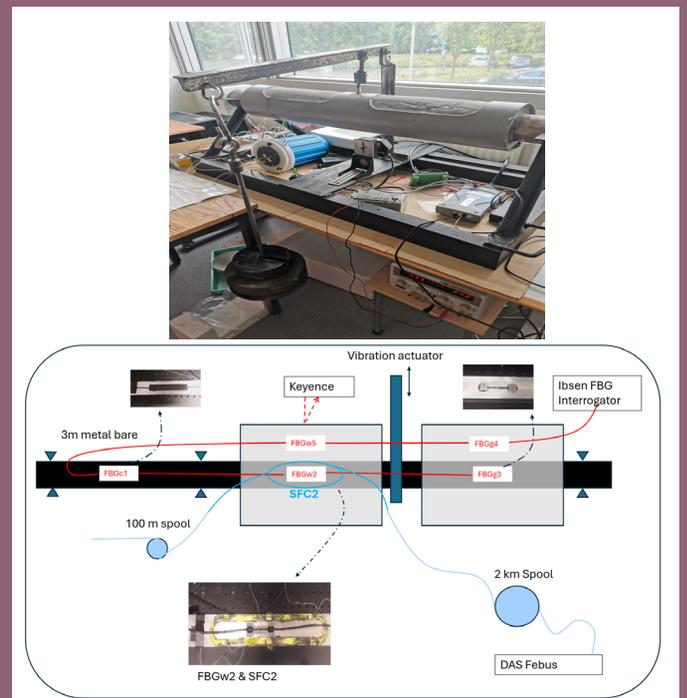


Photo et schéma représentatif du modèle analogique

Projets de recherche nationaux et internationaux

Depuis sa création, l'ITI GeoT s'implique activement dans de nombreux projets de recherche d'envergure nationale et internationale. Au fil des années, de nouveaux projets viennent enrichir son portefeuille, positionnant l'ITI GeoT parmi les principaux consortia traitant des Géosciences pour la transition énergétique. Ces initiatives contribuent à renforcer le rayonnement de l'Université de Strasbourg et du CNRS à travers des collaborations prestigieuses.

Grâce à l'ensemble de ces projets, l'ITI GeoT bénéficie d'un effet levier significatif, lui permettant de financer des contrats supplémentaires pour doctorants, post-doctorants et ingénieurs. Depuis ses débuts, l'Institut accompagne et soutient ses membres dans leur engagement au sein de projets d'envergure, tout en promouvant l'interdisciplinarité à travers des interactions renforcées entre les groupes de travail. Cette approche collaborative stimule l'innovation et la recherche autour des thématiques phares de l'ITI GeoT.

Projets nationaux	Projets internationaux	Collaborations industrielles
ANR Geresfault ANR ALTERACTION ANR Monidas ANR PrESENCe ADEME (PhD) GdR HydroGEMM Gutenberg Chair Eurométropole Sismocité (Université & Cité AMI) Research program (PEPR) Sous-sol PC9 Fossé Rhéna	H2022 DT-GEO H2022 Geo-Inquire EPOS ERIC / TCS AH Geothermica DEEP (associé) DEEP-HEAT-FLOWS EERA JPGE CETP Geotwins	Total (PhD) INERIS (PhD) VITO (PhD) Terrensis Georhin Expertise (Préfecture) MIE (Eurométropole) PETR Alsace du Nord

Retrouvez ci-après, une sélection de présentations et de résultats issus de plusieurs de ces projets de grande envergure :

ANR Monidas

Suivi des risques sismiques naturels grâce aux mesures acoustiques distribuées (Natural hazard monitoring using Distributed Acoustic Sensing, DAS)

Au total, 5 partenaires répartis en 3 organismes de recherche et 2 industriels.

Nous sommes partenaire du projet entre 2020-2024.

Les capteurs DAS utilisent des fibres optiques de télécommunication standard pour mesurer la déformation des câbles dans la plage acoustique de 0,1 à 1 kHz. Ce faisant, une seule fibre couplée à des techniques de traitement de données de points peut agir comme une distribution dense de capteurs sur des dizaines de kilomètres afin d'améliorer la détection et la caractérisation des sources sismiques, de la déformation sismo-volcanique, des glissements de terrain, entre autres. L'objectif ultime du projet Monidas est de fournir à la communauté géophysique française un nouvel instrument, basé sur une technologie qui a montré des résultats prometteurs en matière de surveillance et de traitement des données.

En savoir plus, <https://anr.fr/Project-ANR-19-CE04-0011>



ANR AlterAction

Altération dans les failles actives : application aux réservoirs géothermiques (Alteration in active faults application to geothermal reservoirs)

Au total, 4 partenaires français et nous sommes partenaire du projet entre 2024-2027.

Le projet se concentre sur le processus de maturation des failles actives dans la croûte supérieure par l'altération chimique de leurs parois, et sur la rétroaction entre l'altération et l'activité tectonique. La principale hypothèse de recherche est que l'activité de la faille induit de nouvelles fractures qui renforcent les interactions fluide-roche et l'altération de la zone de faille associée. L'accent est mis sur les roches granitoïdes, qui constituent la lithologie des réservoirs géothermiques de la vallée du Rhin et celle des roches du mur de la faille de Nojima responsable du tremblement de terre de Nanbu-Kobe en 1995 au Japon.

En savoir plus, <https://anr.fr/Project-ANR-23-CE05-0023>



Geothermica DEEP / ADEME

Innovier pour réduire les risques des projets de géothermie profonde (Innovation for De-Risking Enhanced Geothermal Energy Projects - DEEP)

Au total, 10 partenaires dont 7 universités et 3 industriels.

Nous sommes partenaire du projet entre 2021-2024.

Le projet DEEP rassemble une équipe interdisciplinaire de scientifiques et de professionnels du monde entier pour développer des approches innovantes de la gouvernance des risques géothermiques. Elles se fondent sur les progrès récents des technologies de surveillance sismique, de modélisation et de la compréhension des processus. Dans le cadre de ce projet, un co-financement avec l'ADEME a été mise en place et permis le financement d'un projet de thèse sur 3 ans.



ANR PrESENCe

Fournir et partager des connaissances scientifiques en accès libre beaucoup plus avancées aux parties prenantes (le grand public, les journalistes, les politiciens, les citoyens) par le biais d'un nouveau paradigme de surveillance de la sismicité induite dans un environnement urbain

Au total, 3 partenaires l'ITES, l'EOST et le LISEC, tous membres de l'ITI GeoT qui porte ce projet entre 2022-2026.

Le projet cherche à déployer un large ensemble de sismomètres à faible coût dans des bâtiments distribués avec une transmission en (quasi) temps réel par internet, avec la participation des autorités publiques locales et des résidents.

L'objectif est triple : améliorer l'imagerie et la surveillance du sous-sol, fournir des informations scientifiques publiques avancées à la communauté locale et développer un cadre de sciences sociales pour suivre l'évolution de la perception sociétale de la technologie.

Projet associé complémentaire : Sismocité

L'objectif de ce projet est d'initier des interactions fortes entre l'université et la collectivité sur le sujet de la géothermie profonde et plus particulièrement de la sismicité associée.

Entre 2023 et 2024, il a visé compléter le projet ANR PrESENCe avec le contexte récent de Strasbourg, où l'avenir de la géothermie profonde est fortement questionné suite aux impacts de la sismicité depuis 2019. Le projet a mis en place un crowdsourcing basé sur des interactions préalables avec des élus, des associations et des groupes de citoyens concernés par les projets de géothermie profonde.



Stations sismomètre à bas-coût, Raspberry Shake installées chez les particuliers et maires



Déploiement :

41 stations installées dans l'Eurométropole

31 stations installées dans l'Outre-Forêt

Mise en place d'une méthode de pointés automatiques par deep learning et identification de 500 événements en mai 2024 dans l'Outre-Forêt

Les stations à bas-coût proches des événements montrent des distributions similaires aux stations permanentes : qualité des mesures

Analyse des données mesurées :

L'utilisation des données issues des stations à bas-coût en plus des données des stations permanentes permet une amélioration :

- si on compare les changements de magnitude de complétude (à certaines périodes de la journée)
- de la précision de la localisation si on compare l'incertitude sur la profondeur

Les événements du catalogue de la crise de Strasbourg ont été relocalisés.

Interactions Citoyens et scientifiques :

3 Sismo-stammtische (~4 heures chaque) ont été organisés à travers l'Alsace réunissant en tout 68 citoyens (représentant 41 sites hébergeurs) et une dizaine de scientifiques (sismologues et sciences humaine)

Rédaction des FAQ en libre accès sur le site web du projet
Plusieurs communications grand public ont été faites : reportage SAVOIR(s) et articles.

Sciences humaines et impact des sismomètres à bas-coût sur la perception sociale :

15 entretiens de citoyens hébergeurs dans l'Eurométropole

15 entretiens de citoyens hébergeurs dans l'Outre-Forêt

Réalisation de plusieurs entretiens (~30) avec des mairies et associations de citoyens

Analyse du corpus média mis en place avec la publication d'article à venir (2025)

Horizon Europe DT-Geo

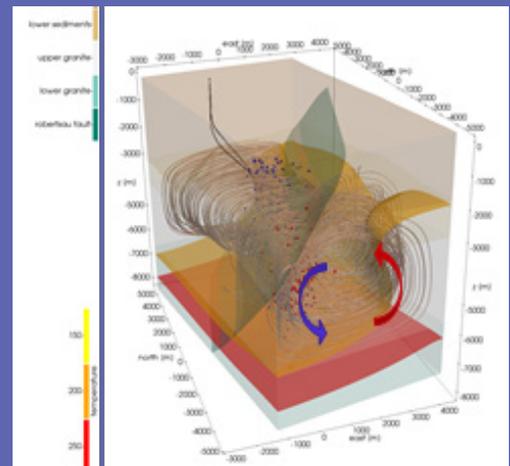
Déploiement un prototype de jumeau numérique (DT) sur les extrêmes géophysiques, composé de composants jumeaux numériques (DTC) interdépendants, traitant des risques géologiques liés aux tremblements de terre (naturels ou induits par l'anthropogénie), aux volcans et aux tsunamis déclenchés par des tremblements de terre ou des glissements de terrain

Au total, 19 partenaires en Europe. Nous sommes le leader du WP8 : anthropogenic hazards.

1. Déployer un prototype pré-opérationnel de DT pour son intégration future dans l'initiative Destination Terre
2. Contenir 12 DTCs aux TLR 6-7 traitant de situations dangereuses spécifiques
3. Fournir un cadre flexible pour la validation FAIR, l'analyse d'incertitude et son intégration dans les infrastructures de recherche EPOS et EuroHPC (HPC/virtual cloud computing)
4. Vérifier DT-Geo dans 13 sites de démonstration particulièrement pertinents



Le projet DT-GEO nous a permis d'avancer dans le développement de jumeau numérique de réservoirs géothermiques profonds comme ceux de Soultz-sous-Forêts ou Vendenheim. D'une part, par des approches statistiques utilisant la plate-forme EPISODES (<https://episodesplatform.eu>), nous avons caractérisé des comportements génériques de distribution spatio-temporelle de la sismicité pour les stimulations hydrauliques réalisées régionalement voire internationalement. D'autre part, pour mieux comprendre les mécanismes de déclenchement de la sismicité à grande distance des puits (~5km) dans le cadre du projet de géothermie profonde de Vendenheim (GeoRhin), nous avons développé un modèle numérique à grande échelle (8kmx8kmx6km) de la région des puits. Nous avons réalisé des expériences in-silico pour reproduire les réponses géomécaniques du réservoir géothermique. Le modèle est basé sur MOOSE/GOLEM (approche par éléments finis) et intègre le modèle géologique régional public GEORG qui comprend les principales lithologies et les failles à grande échelle de la région. Nous montrons que la circulation hydrothermale naturelle des fluides à grande profondeur peut être responsable d'une forte hétérogénéité spatiale de la sensibilité du milieu naturel aux perturbations de contrainte générées par les injections, et du coup être responsable du déclenchement à grande distance et dans une région spécifique, d'une sismicité induite ce qui pose de nouvelles questions sur la taille de la zone d'influence de ces projets de géothermie profonde.



Circulation hydrothermale modélisée en profondeur autour de la région des puits de Vendenheim (lignes noires), représentée par des lignes de courant et de grandes flèches (rouges pour la remontée et bleues pour la descente). Les isothermes à 150°C, 200°C et 250°C sont représentés par des surfaces colorées. La zone de faille ciblée est représentée par la surface verte.

EPOS (European Platform Observing System) ERIC : TCS AH

Collecte, gestion, archivage et diffusion des données en sciences de la Terre

Au total, 250 partenaires de 25 pays européens. L'ITI GeoT participe activement à l'axe « Risques anthropiques » (Anthropogenic hazards – AH), notamment en ce qui concerne la géothermie profonde. Dans ce cadre, il gère le Centre de données en géothermie profonde (CDGP) nœud français du TCS-AH.

L'approche est multidisciplinaire et s'inscrit dans la dynamique de science ouverte. L'une des principales missions du projet est d'améliorer l'accès et l'utilisation des données multidisciplinaires provenant de réseaux de surveillance et des laboratoires européens.

Projet associé complémentaire : Horizon Europe Geo-INQUIRE

Intégration d'un grand nombre de données et de produits différents grâce à des services déjà disponibles pour la communauté géoscientifique en Europe et fournis par les infrastructures de recherche participantes

Au total, 52 partenaires en Europe. Nous sommes co-leader du WP4 : "TA1/VA3 Access to products enabling curiosity-driven science for georesources exploration and exploitation" entre 2022 et 2026.

Les objectifs scientifiques de Geo-INQUIRE sont résumés par les six priorités suivantes :

1. Consolider et améliorer l'accès à des ensembles de données multidisciplinaires et interopérables : vers des résolutions spatiales et temporelles plus élevées qui permettront une recherche axée sur la curiosité, auparavant infaisable
2. Améliorer l'accès à des observables et des produits nouveaux et innovants
3. Ouverture de nouvelles possibilités de recherche pour permettre une meilleure compréhension de l'interface entre la terre solide et son enveloppe fluide
4. De l'aléa unique au risque multiple : soutien aux études transdisciplinaires et intégrées des géorisques extrêmes
5. Possibilités de recherche inédites dans le domaine de la gestion des géoressources grâce à la fourniture de données, de produits et de services innovants
6. Fourniture de techniques innovantes de gestion des données, de simulation et de visualisation à l'interface avec les installations de calcul intensif



Bilan 2023 et 2024 : avancées et innovations dans la fourniture de données scientifiques

L'année 2024 a marqué des progrès significatifs dans la gestion et la fourniture des données. Nous avons enrichi les épisodes existants avec de nouveaux ensembles de données avec **20 nouveaux catalogues**, incluant des catalogues microsismiques et des métriques pétrophysiques, tout en poursuivant nos collaborations avec **TCS GNSS et TCS GIM** pour intégrer des données géodésiques et de forage. Par ailleurs, des discussions avec des experts en sciences sociales visent à élargir l'accès aux données interdisciplinaires.

Nous avons également optimisé nos métadonnées et DOI, **améliorant leur score FAIR de 10 %** pour les plateformes EPISODE et CDGP. Ce travail se poursuivra en collaboration avec l'IGPAS afin d'atteindre le score maximal.

Enfin, nous avons engagé des initiatives stratégiques, notamment le développement de nouvelles applications et de jumeaux numériques dans la plateforme EPISODE (à travers le projet DT-Geo) ainsi que la restructuration de la plateforme CDGP, soutenue par le recrutement d'un spécialiste en informatique. Objectifs : une interface plus ergonomique, un processus d'identification automatisé et une gestion améliorée des demandes.

Avec ces avancées, nous renforçons notre engagement pour une gestion optimisée et accessible des données scientifiques.

L'objectif pour l'avenir est de poursuivre le développement du nœud français CDGP du TCS AH dans EPISODES et son intégration dans la nouvelle infrastructure EPOS-France, en tant que service dédié aux données et aux services liés aux risques anthropiques.

PEPR sous sol PC9

Programme et Equipement Prioritaires de Recherche - Sous sol - Projet ciblé Fossé Rhénan (PC9)

Dans un contexte global de transition énergétique, le développement de la géothermie profonde dans le Fossé rhénan représente un enjeu majeur et une opportunité d'exploiter un énorme potentiel de chaleur/électricité décarbonée et de coproduits associés (lithium, hydrogène, hélium...). Avec ses atouts géologiques et l'expérience acquise depuis plus de 40 ans, ce fossé peut devenir un laboratoire de recherche naturel.

Au total, 10 partenaires français pour un budget de 2,058 millions d'euros pour les sept prochaines années.

Le projet est coordonné par J. Schmittbuhl (ITI GeoT - EOST/ITES Université de Strasbourg) et B. Sanjuan (BRGM).

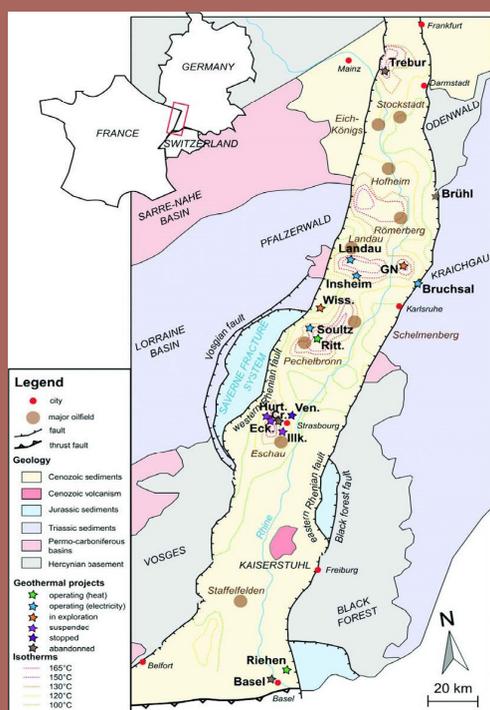
WP1. Caractérisation des hétérogénéités spatiales des réservoirs dans le Fossé rhénan : besoins en puits géothermiques scientifiques profonds

WP2. Exploitation des ressources du Fossé rhénan : besoins d'une imagerie de la circulation des fluides en profondeur

WP3. De l'"acceptabilité" à la "Recherche et Innovation Responsable" (RRI) de la géothermie profonde : le démonstrateur de Strasbourg



Photo du kick-off meeting,
13-15 mars 2024, Mont
Saint-Odile, Alsace, France



Projets en géothermie profonde dans le Fossé rhénan supérieur (d'après Dalmais et al., 2022)

Le Fossé rhénan supérieur s'étend de Bâle à Mainz sur environ 300 km et sépare la France de l'Allemagne le long d'un fossé de 30 à 40 km de large. Des travaux de géophysique et de forage ont permis de mettre en évidence un gradient thermique anormalement élevé de 100°C/km, qui a été à l'origine du projet européen de Soultz-sous-Forêts et a permis de créer le premier site de Enhanced Geothermal System (EGS) opérationnel au monde.

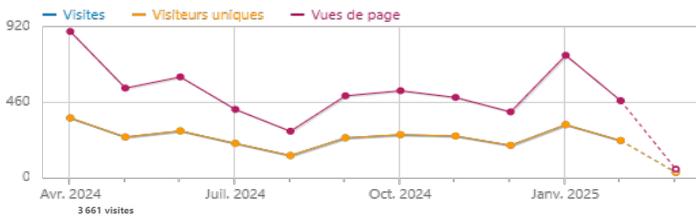
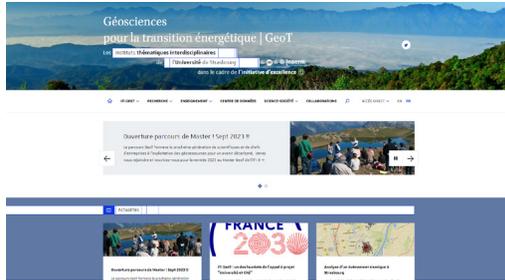
Toutefois, les récents échecs de l'exploration géothermique (Bâle 2006, Landau 2013, Vendenheim 2020) montrent que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les risques, comprendre les processus liés à l'exploitation thermique du sous-sol et mieux localiser les sites des futures centrales géothermiques.

L'importance du projet n'est pas seulement d'explorer et d'extraire l'énergie géothermique (chauffage et/ou électricité) et les coproduits associés tels que le lithium et l'hydrogène (Sanjuan et al., 2016), mais aussi de servir de laboratoire naturel pour mieux comprendre comment produire de l'énergie à faible teneur en carbone dans les réservoirs fracturés profonds.

Valorisation →

Valorisation et communication

Nouveau site web
publié début 2023
geot.unistra.fr



Sur l'année 2024



Rapport d'activité 2021-2022
à retrouver sur notre site web

Lancement réseaux sociaux : **itigeot**



Couverture

140

Comptes touchés

Followers 64

Non-followers 76

Les 90 derniers jours de 2024

Par type de contenu

Tout Followers Non-followers

Reels 124.0

Publications 65.0

Stories 49.0

Followers Non-followers



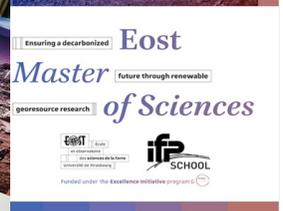
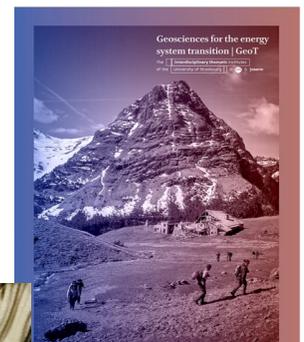
Tournage d'une capsule de présentation de l'ITI GeoT - à retrouver sur Youtube



Publication de la plaquette du **Master GeoT**



Download MSc GeoT flyer



Valorisation →

Instituts thématiques interdisciplinaires | ITI
de l'Université de Strasbourg & CNRS & Inserm



Geodays 2023



EAGE 2023



JU 2024

« Repenser les modalités du débat public »



Membre du Laboratoire interuniversitaire des sciences de l'éducation et de la communication (Lisea), Philippe Chavot coordonne le groupe de travail en sciences sociales de l'Institut thématique interdisciplinaire Géosciences pour la transition énergétique (ITI GeoT). Il a étudié plusieurs controverses sociotechniques récentes, controverses qui l'ont conduit à réfléchir sur les modalités de la participation citoyenne et à développer des projets participatifs pour contribuer à atténuer.

Que recouvre le terme de « sciences participatives » ?
Ce terme désigne différents types de projets de recherche auxquels scientifiques et citoyens contribuent. Le public y occupe une place qui varie en fonction de l'investissement qui lui est demandé. Certains projets de type crowdsourcing demandent à un grand nombre de citoyens de collecter et transmettre des données aux chercheurs. Dans le cadre du projet SismoCitoyen auquel il participe, il agit pour des particuliers d'habiter un capteur qui transmet automatiquement des

relevés d'activité sismique. Ceci ne demande ni un engagement très important, ni une expertise scientifique particulière. D'autres programmes en revanche sont construits sur la base d'un investissement plus conséquent, sur le mode du don « contre-don ». C'est une approche vers laquelle nous aimerions tendre avec SismoCitoyen, en initiant un réel dialogue avec les citoyens et en mettant en place une concentration sur la surveillance sismique des projets industriels.
Selon vous, à quel sont dues les controverses que vous avez étudiées ?
Une controverse survient lorsqu'un projet techno-industriel vient perturber un territoire de vie et se confronte à des aspirations locales. Les projets de géothermie grande profondeur menés en Alsace que nous étudions depuis 2013 dans le cadre de l'ITI GeoT en sont une bonne illustration. Certains ont fait l'objet de controverses car les

Savoir(s) n°48 17

Retrouvez l'article de P. Chavot (WG7 leader) sur Savoir(s) magazine unistra n°48



Refonte du site web sismo-citoyen.fr



1ère newsletter (rédigée par A. Schlupp dans le cadre du projet ANR PrESSENCE) en lien avec les événements SismoStammtsich = rencontres citoyens et chercheurs publiée - à retrouver sur la page Ressources du site sismo-citoyen.fr



Tournage d'un reportage sur le projet SismoCitoyen - à retrouver sur savoirs.unistra.fr



Séminaires internes

WG1	Monitoring induced micro-seismicity in urban context using very small seismic arrays	R. Fiori	
WG2	Ongoing and future geodetic observations associated with geothermal wells in Alsace	B. Rousset	
WG6	Sedimentological control on permeability distribution: The middle Buntsandstein case study	G. Bozetti & L. Bofill	
WG3	Direct assessment of the hydraulic structure of the plate boundary at the toe of the Nakai accretionary prism	J. Pwavodi	
WG4	Chasing deep geothermal resources in crystalline rocks	A. Bischoff	Geological survey of Finland
WG1/9	The largest induced earthquakes during the Geoven deep geothermal project, Strasbourg, 2019-2022: from source parameters to intensity maps	O. Lengliné	
WG4	Permeability reduction in microcracked and fractured granite at elevated pressure and temperature	L. Carbillet	
WG5	Le projet de Lithium de France en Alsace du nord	J. Klee	Lithium de France
WG1	Investigating the spatio-temporal evolution of natural and induced seismic swarms	R. Minetto	
WG6	Lithium resources in geothermal brine of the Upper Rhine Graben and possible extraction technologies	J. Kolb	KIT Germany
WG6	New constraints on the heat production of the lower continental crust of the Upper Rhine Graben: insights from xenoliths retrieved in Cenozoic volcanoes	B. Petri & F. Chopin	
WG1	Assessing the performance of low-cost stations within dense semi-permanent seismic networks - Quantifying the 4D seismic density evolution caused by geothermal injection - Seismic activity induced by the geothermal doublet at Balmatt (Belgium)	R. Minetto - Z. Wang - R. Gautham	
WG9	Large-scale reservoir modeling of the Vendenheim geothermal site (France)	J. Abreu Torres	
WG8	New catalogue of the seismicity induced by the stimulations of the GRT1 well at Rittershoffen geothermal site	E. Gaucher	KIT Germany
WG7	La géothermie profonde en Alsace dans la presse quotidienne régionale. Retour sur la neutralité des journalistes	Y. Serrano	
WG6	Distribution of fluvio-Aeolian deposits of the middle Buntsandstein group Lower Triassic, Upper Rhine Graben (France)	G. Knobelock	
WG2	Modeling the response of Earthquakes to transient stresses	K. Siorattanakul	Caltech, USA
WG4	Deformation, failure and fluid flow of carbonates around geothermal sites in Alsace	S. Mammadov	
WG5	Natural hydrogen in Brazil: State of the Art and Challenges	C. Arrouvel	UFRJ Brazil
WG3	Tentative mass budget at Theistareykir geothermal field (Iceland) from timeslapse super hybrid gravimetry	U. Riccardi	Naples, Italy

Communications en congrès

WG1 :

R. Minetto, O. Lengliné, M. Grunberg, M. Turlure, A. Schlupp, J. Vergne, H. Jund, J. Schmittbuhl (2024). Monitoring induced seismicity in urban environment: Assessing the performance of low-cost sensors within Dense Semi-permanent Seismic Networks. EGU 2024, Vienne, Autriche

R. Minetto, O. Lengliné, J. Schmittbuhl (2024). Discriminating Between High-Hazard and Low-Hazard Faults through Cluster Analysis: A Case Study of Induced Seismicity at the Geoven Geothermal Site, Strasbourg, France.

F. Mattern, J. Vergne, D. Zigone, J. Schmittbuhl, H. Karabulut (2024). Passive monitoring of a deep geothermal reservoir in the Strasbourg area by interferometric approaches using ambient seismic noise. GU 2024, Vienne, Autriche

F. Mattern, J. Vergne, D. Zigone, J. Schmittbuhl (2024). Passive monitoring of a deep geothermal reservoir in the Strasbourg area by interferometric approaches using ambient seismic noise. DEEP Annual Meeting. Bochum, Allemagne.

WG3 :

Giuliante, B., Jousset, P., Krawczyk, C., Hinderer, J., Riccardi, U., Toledo, T., Forster, F., & Mortensen, A., (2023). IAVCEI Scientific Assembly, New Zealand

Giuliante, B., Jousset, P., Krawczyk, C., Hinderer, J., Riccardi, U., Toledo, T., Forster, F., & Mortensen, A., (2023). Modelling mass balance and stress transfer at Krafla and Theistareykir geothermal systems, Iceland. EGU 2023, Vienne, Autriche

B. Giuliante, P. Jousset, C. Krawczyk, J. Hinderer, U. Riccardi, N. Portier, F. Forster, A.K. Mortensen, (2024). Subsurface mass modelling at Theistareykir geothermal field, Iceland, using hybrid gravimetry.

Geodynamics and Earth Tides Symposium, Strasbourg

WG4 :

Kushnir, A., Heap, M., Baud, P., Reuschlé, T., & Schmittbuhl, J., (2023). Reactivating sealed joints: rock strength reduction and permeability enhancement. EGU 2023, Vienne, Autriche

Carbillet, L., Heap, M., & Baud, P., (2023). The evolution of permeability with pressure and temperature in microfractured granite. EGU 2023, Vienne, Autriche

Kushnir, A.R.L., Heap, M.J., Baud, P., Reuschlé, T., and Schmittbuhl, J., (2023). To break or not to break: The role of secondary mineralisation on joint reactivation in sandstone. 15th EuroConference on Rock Physics and Rock Mechanics. Pays-bas.

Baud, P., Griffiths, L., Heap, M., Carbillet, L., & Violay, M., (2023). Fluid flow through microcracked and fractured granitic reservoirs. 84th EAGE European Association of Geoscientists & Engineers, Vienne, Autriche.

Heap, M.J., (2023). Geothermal energy exploitation in the Upper Rhine Graben and the role of the laboratory in geothermal exploration and exploitation (invited keynote). International Conference on Earth Energy Science (Chongqing, Chine).

M.J. Heap, A. Bischoff, T. Luoto, T. Reuschlé, S. Vuoriainen, M. Spitz, M. Leon-Stackow, (2024). A comprehensive petrophysical databank of crystalline reservoirs for

assessing deep geothermal exploration targets in Finland and abroad. EGU 2024, Vienne, Autriche.

A. Bischoff, D. Carbajal, M. Heap, S. Vuoriainen, T. Luoto, T. Reuschlé, J. Kuva, K. Cutts, (2024). Crystal clear: A comprehensive petrophysical catalog for assessing deep crystalline reservoirs in Finland and beyond. Lithosphere Symposium 2024, Finland.

P. Baud, M.J. Heap, A.R.L. Kushnir, (2024). Influence of sedimentary bedding and joints on the mechanical strength of the Buntsandstein. 85th EAGE European Association of Geoscientists & Engineers, Norvège.

S. Mammadov, P. Baud, M.J. Heap, T. Reuschlé, (2024). Mechanical and physical properties of oolitic limestones from the Upper Rhine Graben. 7th edition of the International Workshop of Rock Physics (7IWRP), Pau, France

WG5 :

J. Murray (2023). Natural hydrogen generation in granitic geothermal reservoirs of the Upper Rhine Graben, France. CSIRO Australia Symposium on Natural Hydrogen, Australie.

A. Wallentin, J. Schmittbuhl, (2023). Understanding native Hydrogen generation in granitic geothermal reservoirs of the Upper Rhine Graben, an experimental and geochemical modeling approach. EGW 2023, Pays-Bas.

J. Murray (2023). Natural hydrogen generation in granitic geothermal reservoirs. Goldschmidt Conference, Lyon, France

37

Communications

Communications en congrès

WG6:

Bofill L., Bozetti G., Ghienne J., Schuster M., De Souza E., Scherer C., (2023). Architectural characterization of a braided fluvial system and its permeability heterogeneity: lower triassic Bunstandstein sandstones, east France. IFSC - International Fluvial Sedimentology Conference, Riva del Garda, Italy.

Bozetti G., Bofill L., Schuster M., Ghienne J., Gindre--Chanu L., Scherer C., De Souza E., (2023). Fluvio-aeolian deposits of the lower triassic Buntsandstein group: stratigraphy and exploratory potential in the upper Rhine graben. IFSC - International Fluvial Sedimentology Conference, Riva del Garda, Italy.

G. Meyer Neibert Knoblock, L. Me-deiros Bofill, G. Bozetti, M. Schuster, J-F. Ghienne, (2023). Sedimentological and stratigraphic evolution of the middle Buntsandstein group, upper Rhine graben, NE France. British Sedimentology Research Group (BSRG) Annual Meeting, Loughborough.

B. Petri, F. Chopin, M. Burckel, (2023). The lower continental crust across Variscan domains: insights from xenoliths retrieved in Cenozoic volcanoes of Western and Central Germany. Réunion des Sciences de la Terre 2023, Rennes, France

G. Meyer Neibert Knoblock, L. Me-deiros Bofill, G. Bozetti, M. Schuster, J-F. Ghienne, (2024). Distribution of fluvio-aeolian deposits of the middle Buntsandstein group, lower triassic, upper Rhine graben (NE France). IAS - International Association of Sedimentologists, Aberdeen, Royaume-Uni.

Bozetti G., Bofill L., Schuster M., Ghienne J., Scherer C., De Souza E., (2024). Revisiting the lower triassic Buntsandstein group, upper Rhine graben area (France - Germany): a combined outcrop and core

approach. IAS - International Association of Sedimentologists, Aberdeen, Royaume-Uni.

WG7:

J. Arnaud, P. Chavot, A. Masseran, Y. Serrano, J. Zoungrana, (2023). On the road to citizen seismology: the PrESENCe and Sis-moCité research programmes. EGW 2023, Pays-Bas.

P. Chavot, (2023). L'information comme enjeu ? Controverses autour de la géothermie profonde en Alsace. 1ères rencontres EPOS-France, Saint-Jean Cap-Ferrat, France.

P. Chavot (2023). Sciences participatives et surveillance sismique des projets industriels. 8e Congrès trinational climat-énergie de la Conférence du Rhin Supérieur Géothermie profonde: L'acceptabilité comme facteur de réussite, Landau, Allemagne.

Y. Serrano, P. Chavot, A. Masseran, J. Zoungrana, (2023). L'implicite de "l'acceptabilité". Mise en récit de l'acceptabilité sociale autour de la géothermie profonde en Alsace : enjeux et stratégies discursives. Colloque "L'acceptabilité sociale : enjeu de gouvernance, enjeu de société", Gredeg, Nice, France.

P. Chavot (2024). La communication scientifique comme enjeu ? Regard critique sur les reconfigurations des politiques de communication publique des sciences en France (années 1980 à 2020). Colloque

de l'Observatoire science-société (MSH-Alpes, Université Grenoble Alpes); "Dynamiques des recherches en communication et médiation scientifiques : Transmettre, hybrider, partager, débattre"

WG8:

Schaming M., Fremand A., Turlure M., Schmittuhl J., (2023). Access control and reporting at the Data Center for Deep Geothermal Energy. EGU 2023, Vienne, Autriche.

Benlalam S., Schaming M., Rousset B, Schmittuhl J., (2023). Data Center for Deep Geothermal Energy (CDGP) and EPISODES platform (EPOS TCS AH): adding GNSS and geological data. EGW 2023, Pays-Bas.

Benlalam S., Schaming M., Schmittuhl J., (2023). Données et services GNSS et géologiques au Centre de Données de Géothermie Profonde (CDGP), et lien avec les TCS GNSS et GIM. 1ères rencontres EPOS-France, Saint-Jean Cap-Ferrat, France.

Benlalam,S., Derode,B., Engels,F., Grunberg,M, Schmittbuhl,J (2024). CDGP data center, new data for interdisciplinarity research. EGU 2024, Vienne, Autriche.

WG9:

J. Abreu-Torres, G. Hutka, G. Blöcher, M. Cacace, V. Magenet, and J. Schmittbuhl (2024). Large-scale reservoir modeling of the Vendenheim geothermal site (France). EGU 2024, Vienne, Autriche.

Z. Wang, O. Lengliné, and J. Schmittbuhl (2024). Quantifying the 4D Seismic Density Evolution Caused by Geothermal Injection. EGU 2024, Vienne, Autriche.

37

Communications

Publications

WG1 :

Shu W., Lengliné O., Schmittbuhl J. (2023). Collective behavior of asperities before large stick-slip events. *Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2023JB026696>

Lengliné O., Ampuero J-P., Schmittbuhl J. (2023). Scaling of Repeating Earthquakes at the Transition From Aseismic to Seismic Slip. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2022GL101604>

Lengliné O., Schmittbuhl J., Drif K. K., Lambotte S., Grunberg M., Kinscher J. L., Sira C., Schlupp A., Schaming M., Jund H et Masson F., (2023). The largest induced earthquakes during the GEOVEN deep geothermal project, Strasbourg, 2018–2022: from source parameters to intensity maps. *Geophysical Journal International*. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad255>

Fiori R., Vergne J., Schmittbuhl J., Zigone D. (2023). Monitoring induced microseismicity in an urban context using very small seismic arrays: The case study of the Vendenheim EGS project. *Geophysics*. <https://doi.org/10.1190/geo2022-0620.1>

Drif, K., Lengliné, O., Kinscher, J., & Schmittbuhl, J. (2024). Induced seismicity controlled by injected hydraulic energy: The case study of the EGS Soultz sous Forêts site. *JGR Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2023JB028190>

Griffiths L., Heap M. J., Lengliné O., Baud P., Schmittbuhl J., Gilg H.A. (2024). Thermal Stressing of Volcanic Rock: Microcracking and Crack Closure Monitored Through Acoustic Emission, Ultrasonic Velocity, and Thermal Expansion. *JGR Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2023JB027766>

WG4 :

Kushnir, A.R.L., Heap, M.J., Baud, P., Reuschlé, T., and Schmittbuhl, J. (2023). Reactivation of variably sealed joints and permeability enhancement in geothermal reservoir rocks. *Geothermal Energy*. <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00271-5>

Bischoff A., Heap M. J., Mikkola P., Kuva J., Reuschlé T., Jolis E. M., Engström J., Reijonen H., Leskelä T. (2024). Hydrothermally altered shear zones: A new reservoir play for the expansion of deep geothermal exploration in crystalline settings. *Geothermics*. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102895>

Xue Y., Xu T., Heap M.J., Zhu W., Ranjith P.G., Li Z. (2024). Effect of pH on primary and secondary crack propagation in sandstone under constant stress (creep) loading. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135727>

Griffiths L., Heap M.J., Lengliné O., Baud P., Schmittbuhl J., Gilg H.A. (2024). Thermal Stressing of Volcanic Rock: Microcracking and Crack Closure Monitored Through Acoustic Emission, Ultrasonic Velocity, and Thermal Expansion. *JGR Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2023JB027766>

Heap M.J., Alizada G., Jessop D.E., Kennedy B.M., Wadsworth F.B. (2024). The influence of temperature (up to 120 °C) on the thermal conductivity of variably porous andesite. *Journal of Volcanology and Geothermal research*. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108140>

Heap M.J., Bayramov K., Meyer G.G., Violay M.E.S., Reuschlé T., Baud P., Gilg H.A., Harnett C.E., Kushnir A.R.L., Lazari F., Mortensen A.K., (2024). Compaction and Permeability Evolution of Tuffs From Krafla Volcano (Iceland). *JGR Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2024JB029067>

Villeneuve M.C., Jones T.P.C., Heap M.J., Kennedy B.M., Cole J.W., Sratovich P.A., (2024). Physical and mechanical depth relationships of rocks from the Rotokawa Geothermal Reservoir, Taupō Volcanic Zone, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. <https://doi.org/10.1080/00288306.2024.2424847>

Carbillet L., Griffiths L., Heap M.J., Duwiquet H., Baud P., Violay M.E.S., Reuschlé T., Guillou-Frottier L., (2024). The Influence of Micro- and Macrocracks on the Permeability of Granite. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04174-0>

Noël C., Fryer B., Baud P., Violay M., (2024). Water weakening and the compressive brittle strength of carbonates: Influence of fracture toughness and static friction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105736>

WG5 :

Murray, J. Guzmán, S., Tapia, J. Nordstrom, D.K., (2023). Silicic volcanic rocks, a main regional source of geogenic arsenic in waters: insights from the Altiplano-Puna plateau, Central Andes.. *Chemical Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121473>

Murray, J., Tapia, J., Ormachea, M., Tirado, N., Nordstrom, D. K., (2023). Towards a comprehensive understanding of the origin, distribution, and biogeochemistry of arsenic in the Altiplano-Puna plateau of South America with the IGCP-707 project. *EPISODES Journal of International Geoscience*. <https://doi.org/10.18814/epiuios/2023/023017>

WG6 :

Bofill L., Bozetti G., Schäfer G., Ghienne J.F., Schuster M., Scherer C., de Souza E., (2024). Quantitative facies analysis of a fluvio-aeolian system: Lower Triassic Buntsandstein Group, eastern France. *Sedimentary geology*. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2024.106634>

WG7 :

Serrano Y., Chavot P., Masseran A., Zoungrana J., (2023). L'implicite de l' "acceptabilité". La géothermie profonde en Alsace. Chapitre d'ouvrage, L'acceptabilité sociale. Enjeux de société et controverses scientifiques, Paris, Presses des Mines, 2023.

WG9 :

Pollet-Villard M., Bouissonni A., Schafer G., Ackerer P., Fritz B., Cabi M., Daval D., (2024). Impact of secondary coatings on the dissolution rate of K-feldspar: A combined experimental and modeling study. *Geothermics*. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102952>

Deng Q., Schmittbuhl J., Cacace M., Blöcherpi G., (2024). Mechanical Stiffness and Permeability of a Reservoir-Scale Rough Fracture During Closure. *JGR Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2024JB029001>

Wang Y., Schmittbuhl J., Azzola J., Mattern F., Zigone D., Lengliné O., Magnenet V., Vergne J., (2024). Modeling the Impact of Seasonal Water Table Fluctuations on Ambient Noise Interferometry Using Acousto-Elastic Effect. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2024GL110239>

22

publications

Graduate program

Élaboration d'un parcours de master

L'ITI GeoT a mis en place une nouvelle offre de formation au travers d'un nouveau parcours au sein du master de l'EOST «Sciences de la Terre et des Planètes, environnement» parcours «Géosciences pour la transition énergétique | GeoT». Après les deux premières années de construction et d'implémentation administrative, le parcours a ouvert en M1 et M2 en septembre 2023.

Le parcours co-construit et co-porté par l'IFP School et l'EOST est maintenant également co-accrédité. Ce partenariat est particulièrement important car il permet, pour la première fois en France, de réunir deux écoles d'ingénieurs en géosciences permettant d'ouvrir les possibles pour nos étudiants à la fois par l'extension de notre programme pédagogique au programme de l'IFP School ainsi qu'en augmentant les opportunités de stages, doctorats et emplois.

Par le biais de son programme d'éducation, l'EOST et l'ITI GeoT ambitionne de créer un parcours d'envergure internationale, reconnu par les professionnels académiques et industriels et de permettre, à termes, à l'EOST de devenir un des leader mondiaux dans la formation des futurs générations de géoscientifiques travaillant dans les énergies renouvelables.

Le parcours est entièrement enseigné en anglais et est accessible à la fois aux étudiants externes nationaux et internationaux ainsi qu'aux étudiants de l'école d'ingénieurs (en tant que parcours de 3A).

Le parcours a été élaboré sur la base des recommandations de la programmation ITI afin d'être :

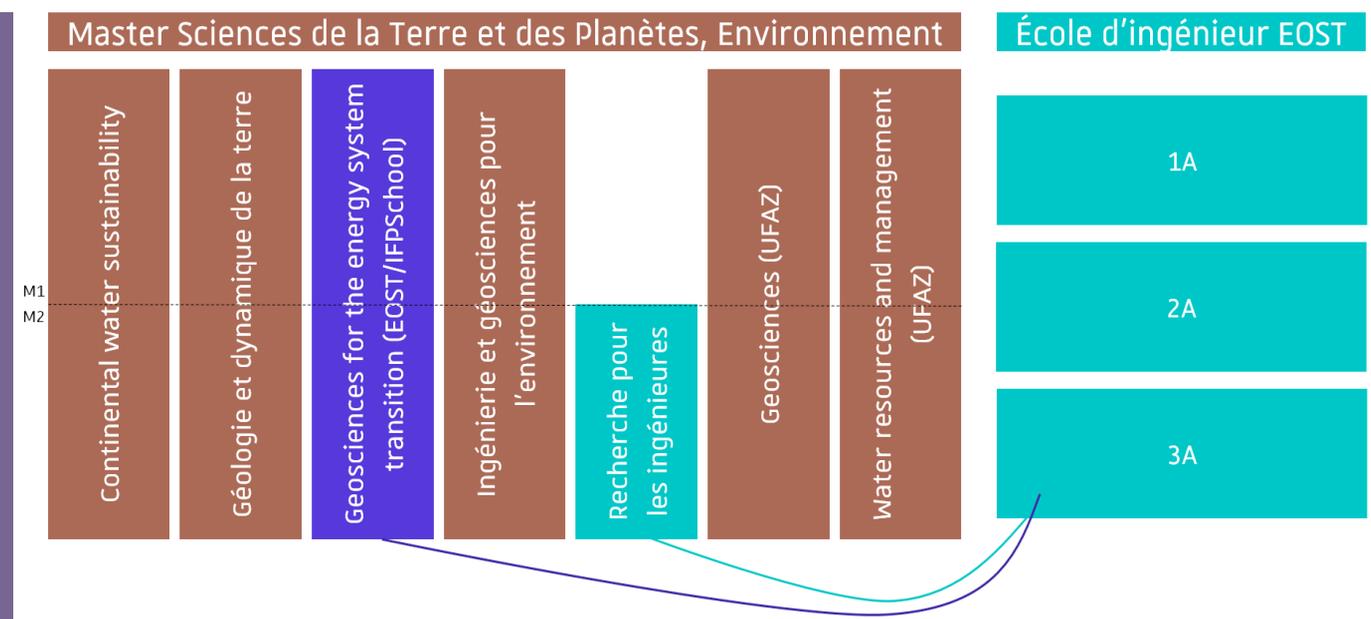
Interdisciplinaire

International

Orienté recherche

ainsi qu'avec les objectifs suivants :

- Permettre une redirection du programme de l'EOST vers les énergies décarbonées
- Introduire l'apprentissage à travers les compétences de recherche dès le niveau master
- Établir un lien fort entre le master et le doctorat



Organisation des parcours au sein de la composante et école d'ingénieurs EOST

Un parcours unique

Dans le but de proposer un programme des plus enrichie et interdisciplinaire, l'ITI GeoT peut compter sur ces laboratoires membres et proposer ainsi des cours de l'EOST, du Lisec et de l'icube.

Par ailleurs, la mutualisation de certains cours avec l'EOST et le partenariat avec l'IFP School permet de réduire significativement le coût de roulement du parcours GeoT.

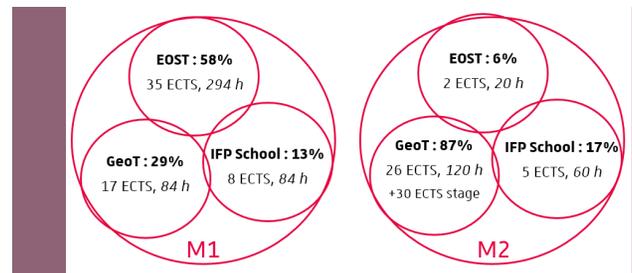
Le programme du parcours de master se décompose ainsi de la manière suivante :

M1S1 : 9 UE mutualisées avec les parcours GDT et ISIE + stage de terrain GeoT

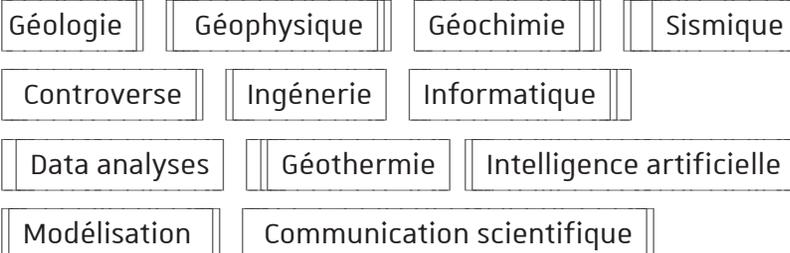
M1S2 : 3 UE mutualisées avec GDT et ISIE + 1 UE mutualisée avec EOST + 2 UE IFP School + 2 UE GeoT

M2S3 : 3 UE IFP School + 1 UE mutualisée EOST + 6 UE GeoT (dont 1 icube et 1 Lisec) + Geothermal field school GeoT/KIT

M2S4 : stage de recherche



Répartitions du financement des heures de cours entre les entités



Download MSc GeoT flyer

4

Semestres

120

Crédits

7 à 10

Bourses MOBIL'ITI / an

10 %

Stages de terrain / école d'automne

40%

Stage et cours pratiques

Chaque année, des enquêtes réalisées auprès des étudiants ont permis d'identifier des axes d'amélioration du programme initial. Les modifications, validées par l'EOST et l'IFP School, seront soumises au vote de la commission d'enseignement de la composante ainsi qu'au comité CFVU de l'Université de Strasbourg au début de l'année 2025, en vue de leur mise en œuvre dès la rentrée universitaire 2025.

Le parcours de master en quelques chiffres

	2023	2024
M1	5	8
M2	6	6
Internationalisation	55%	85%

Les effectifs du parcours de master GeoT

> 50 %

Stages de M2 se font à l'ITES / EOST depuis le début de l'ITI support financé des gratifications de stages et augmentation des interactions entre les étudiants et les équipes de recherche

L'ITI GeoT finance annuellement des bourses MOBIL'ITI afin de soutenir les étudiants emmenageant sur Strasbourg

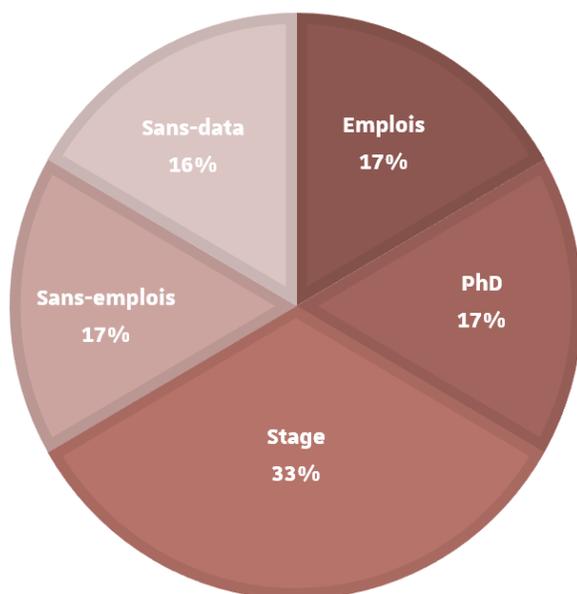
26 500 € alloués rentrée 2023

31 000 €

alloués rentrée 2024

(14 000 € par l'exonération partielle des frais d'inscription)

DEVENIR DES ÉTUDIANTS À 6 MOIS



En décembre 2024, un sondage a été transmis aux étudiants diplômés en juin de la même année. Bien que ces données se limitent, pour l'instant, à la première promotion du parcours, elles offrent des indications préliminaires révélant une insertion professionnelle satisfaisante de nos diplômés.

Il convient de souligner que les étudiants en stage appartiennent à ceux ayant choisi le parcours GeoT comme spécialisation de 3 année (3A) au sein d'une école d'ingénieurs. Ces stages, obligatoires dans le cadre de leur formation, ont permis à ces étudiants de décrocher des emplois dès janvier 2025. Le suivi des étudiants continuera à 6 Mois et 1an dans les années à venir et incluront les prochaines promotions.

La Geothermal field school

Le stage de terrain « Geothermal Master Field School » rassemble des étudiants issus de trois universités françaises et allemandes autour d'une formation mêlant théorie et exemples pratiques en géothermie.

Les trois institutions partenaires sont l'Université de Strasbourg, le Karlsruher Institut für Technologie (KIT) et l'Université de Freiburg.

Le Fossé rhénan, reconnu mondialement pour ses ressources géothermiques fournissant une énergie thermique renouvelable, constitue le cadre idéal pour cette initiative. L'objectif de cette école de terrain transnationale, organisée chaque année, est de proposer une formation innovante de 10 jours. Située dans le nord de l'Alsace, à proximité des

sites géothermiques de Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen, cette formation permet aux étudiants de mettre en pratique des concepts géoscientifiques théoriques à travers l'étude de l'évolution d'un système géothermique profond, de l'exploration à l'exploitation. Le stage expose également les participants aux défis décisionnels liés à l'exploitation industrielle des géoressources renouvelables.

Initialement financée en 2022 et 2023 par le programme EUCOR, l'école de terrain continue de bénéficier de l'engagement de l'Université de Freiburg via le réseau EPICUR, malgré l'arrêt du financement direct. Cette implication assure la pérennité de ce projet transnational de haute qualité.



École 2023 :
25/09/2023 au 06/10/2023
 6 étudiants Unistra
 9 étudiants KIT
 3 étudiants Freiburg



École 2024 :
30/09/2024 au 11/10/2024
 6 étudiants Unistra
 8 étudiants KIT
 1 étudiante Freiburg (EPICUR)



Thèses soutenues

Kamel Drif, 2019-2024 "Développement d'outils de suivi et de prédiction de la sismicité induite par l'injection de fluides dans des réservoirs géothermiques profonds fracturés (EGS)"

Abstract

Cette thèse explore la sismicité induite par l'injection de fluide dans un réservoir géothermique profond et fracturé (EGS, Enhanced Geothermal Systems), un enjeu critique pour le développement durable de la géothermie profonde. Bien que l'origine de ces séismes soit assez bien comprise, anticiper la magnitude maximale, reste un défi en raison notamment des mécanismes non linéaires impliqués (par exemple dans les glissements aismiques ou la sismicité post-injection). Les modèles prédictifs existants n'ont pas toujours réussi à anticiper ces magnitudes maximales, comme le montrent les expériences récentes sur les sites géothermiques de Bâle, Pohang et Vendenheim. Mieux comprendre comment évolue cette sismicité est donc essentiel pour minimiser et maîtriser l'aléa sismique associé à l'injection de fluide notamment en prédisant la magnitude maximale potentielle avec plus de précision. L'approche repose sur l'analyse du lien entre la perturbation apportée à un réservoir géothermique profond et fracturé (par injection de fluide) et sa réponse sismique. En particulier, la relation entre l'énergie hydraulique injectée et l'énergie libérée par les séismes induits a été explorée à travers plusieurs expériences d'injection dans le réservoir géothermique EGS de Soultz-sous-Forêts. Ce site géothermique a été choisi pour cette étude en raison de ses nombreuses expériences d'injection (7 stimulations hydrauliques et 6 tests de circulation) réalisées sur différentes parties du réservoir et sur une longue période de développement. Ceci permet une analyse comparative intra-site détaillée qui examine comment le lien entre l'énergie hydraulique et l'énergie des séismes induits peut être impacté par les changements et les évolutions de la stratégie d'injection (débit, pression du fluide injecté), par la profondeur du réservoir et par l'historique d'injections. Un aspect crucial de cette thèse a été la constitution d'une base de données homogène qui regroupe et harmonise les données hydrauliques (débits et pressions d'injection) et sismologiques (catalogues des événements sismiques) des différentes expériences d'injection pour permettre leur comparaison fiable. L'harmonisation concerne en particulier les catalogues sismologiques dont la constitution ne repose pas sur la même méthode selon les expériences d'injection (réseau de stations et type de magnitude différents). Cette harmonisation a consisté à calculer les moments sismiques de tous les événements inclus dans ces catalogues. Trois méthodes de calcul des paramètres à la source des séismes

ont d'abord été testées sur les séismes observés dans la région de Strasbourg entre 2019 et 2021, afin de déterminer la méthode la plus fiable dans un contexte de micro-sismicité. L'analyse des résultats a montré que l'approche classique consistant à ajuster un modèle de Brune 1970, est la plus adaptée pour le calcul du moment sismique dans le cadre de cette étude. C'est donc cette méthode qui a été utilisée pour calculer les moments sismiques des séismes induits lors des épisodes d'injection opérés dans le réservoir de Soultz-sous-Forêts, et qui a permis de constituer une base de données harmonisée.

Grâce à cette base de données harmonisée, l'étude comparative a permis de mieux comprendre comment l'énergie injectée contrôle la sismicité induite. En effet, l'analyse a montré que le rapport entre l'énergie sismique rayonnée et l'énergie hydraulique injectée est constant au premier ordre pendant les stimulations et de même ordre de grandeur et ce, indépendamment du protocole de stimulation et de la profondeur d'injection. Les re-stimulations (stimulation opérée sur un réservoir déjà stimulé auparavant) présentent initialement des valeurs très faibles de ce rapport. Toutefois, ce rapport augmente rapidement lorsque l'énergie injectée atteint des niveaux comparables à ceux de la stimulation précédente, pour finalement converger vers la valeur caractéristique du réservoir.

Le rapport d'énergie des épisodes de circulation est en moyenne dix fois plus faible que pour les stimulations. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les tests de circulation se déroulent dans des réservoirs déjà stimulés, où une partie de l'énergie de déformation élastique préexistante a déjà été libérée. De plus, le refroidissement du réservoir pendant ces tests pourrait réduire les effets des mécanismes thermo-élastiques derrière la sismicité.

Ces observations suggèrent que la première stimulation d'un réservoir agit comme une relaxation de l'énergie de déformation préexistante, tandis que la re-stimulation ou le test de circulation agissent comme une "recharge". Ainsi, la sismicité est plus susceptible d'être déclenchée pendant les stimulations, et induite lors des re-stimulations et des circulations.

Par ailleurs, le rapport entre l'énergie sismique rayonnée et l'énergie injectée apparaît comme une propriété intrinsèque à grande échelle du réservoir, qui peut être évaluée dès le début de la première stimulation. Sur la base de cette propriété, les travaux de cette thèse ont montré qu'il est possible de prédire la magnitude maximale des séismes induits en connaissant l'énergie hydraulique totale prévue d'injecter, avec une précision supérieure à celle des modèles existants.

Thèses soutenues

Weiwei Shu, 2020-2024 "Modélisation analogique du glissement frictionnel sur les failles : implications pour la sismicité induite et déclenchée"

Abstract

La rugosité multi-échelle de l'interface d'une faille est à l'origine de multiples aspérités qui établissent un ensemble complexe et discret de contacts réels. Puisque les aspérités contrôlent l'initiation et l'évolution du glissement de la faille, il est important d'explorer les relations intrinsèques entre le comportement collectif des aspérités locales et la stabilité frictionnelle de la faille globale. Nous proposons ici une nouvelle approche expérimentale analogique, qui nous permet de capturer l'évolution temporelle du glissement de chaque aspérité sur une interface de faille. Nous constatons que de nombreux événements déstabilisants à l'échelle de l'aspérité locale se sont produits dans la phase de renforcement du glissement, qui est conventionnellement considérée comme le régime stable d'une faille. Nous calculons le couplage intersismique pour

évaluer les comportements de glissement des aspérités pendant la phase de renforcement du glissement. Nous montrons que le couplage intersismique peut être affecté par les interactions élastiques entre les aspérités par l'intermédiaire de la matrice molle encastrée. Les lois d'échelle des événements naturels de glissement lent sont reproduites par notre configuration, en particulier l'échelle moment-durée.



Dariush Javani, 2019-2023 "Modélisation des variations de vitesse des ondes P liées au glissement asismique dans un réservoir fracturé"

Abstract

Cette recherche vise à caractériser numériquement l'origine de la variation de vitesse de l'onde P observée pendant la stimulation hydraulique du puits GPK2. L'apparition de cette anomalie de vitesse des ondes P a été plus rapide et plus étendue que celle qui se produit habituellement au cours d'un processus classique de diffusion des fluides, comme l'ont noté Calo et al. en 2011. Ces changements de vitesse des ondes P ont également été observés à grande échelle (~1km), ce qui suggère que les modules élastiques à grande échelle de la roche réservoir ont changé rapidement. La première phase du présent travail a consisté à étudier l'aspect temporel de l'observation. Elle visait à comprendre la migration de la pression au cours de ce processus de stimulation hydraulique en la simulant à l'aide de 3DEC. Il a été constaté que la pression du fluide migre dans le temps et l'espace suivant un processus contrôlé par l'ouverture des fractures plutôt que par la pression du fluide. Une migration très rapide de la pression de fluide a été observée, avec une diffusivité effective beaucoup plus élevée (~13 m²/s) que celle classiquement observée à Soultz-sous-Forêts (~0,05 m²/s ; voir par exemple Shapiro et al., 2002). Ce processus rapide est compatible avec les résultats de Calo et al. qui

ont observé une migration de plus de 1000 m en 3 heures. Ainsi, pour l'effet temps, nous avons mis en évidence un processus compatible avec l'observation. Dans la deuxième phase, il était prévu d'explorer la valeur à grande échelle des modules élastiques du réservoir de Soultz-sous-Forêts et d'analyser sa sensibilité aux perturbations des contraintes afin de comprendre comment les changements de pression étudiés dans la première phase auraient un impact sur la vitesse des ondes P. Il a été constaté que les modules élastiques à grande échelle ont un impact sur la vitesse des ondes P. Il a été constaté que les modules élastiques à grande échelle à travers la masse rocheuse fracturée s'écartent de ceux de la roche intacte dans les conditions d'un paramètre de densité de fracture élevé. En outre, l'étude de la vitesse des ondes P en fonction du niveau de contrainte appliqué a révélé qu'elle est presque indépendante du niveau de contrainte appliqué. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour répondre pleinement à la question de la thèse. Par exemple, le processus mis en évidence dans la première phase pourrait également avoir des implications sur l'ampleur de la perturbation de la pression loin du puits, ou il serait intéressant d'ajouter une pression de fluide aux simulations de la deuxième phase afin d'étudier l'effet de la pression interstitielle sur la variation de la vitesse de l'onde P.

Thèses soutenues

Lucas Boffill, 2021-2024 "De l'affleurement à l'écoulement des fluides : architecture sédimentaire, hétérogénéité de perméabilité, et effet des faciès sédimentaires dans la modélisation de l'écoulement des fluides : une étude de cas des grès continentaux du Buntsandstein moyen (Trias, Est de la France)"

Abstract

Au fossé rhénan supérieur, dans l'est de la France, le Buntsandstein du Trias inférieur constitue un important réservoir d'eau souterraine et de saumures géothermiques riches en lithium. L'objectif scientifique de cette étude est de comprendre l'architecture de la Formation du Grès Vosgien inférieur (LGV), Buntsandstein moyen ; comment les processus sédimentologiques, à différentes échelles, génèrent des hétérogénéités significatives de perméabilité ; et l'effet de telles hétérogénéités sur les résultats de la modélisation des flux de fluides. L'étude utilise une caractérisation sédimentologique à haute résolution, par le biais de descriptions de profils verticaux, de modèles numériques d'affleurements et d'analyses pétrographiques. Ensuite, les mesures de perméabilité sont couplées aux données sédimentologiques, afin d'identifier différentes échelles de contrôles sédimentaires sur la distribution de la perméabilité. Enfin, un modèle conceptuel hydrostratigraphique réaliste en 2D est généré comme référence, pour évaluer comment différents scénarios de simplification des hétérogénéités impactent la modélisation des flux de fluides, en ce qui concerne le temps de résidence des particules, la macro-dispersivité et l'anisotropie mise à l'échelle. Les résultats indiquent que 93% du LGV est composé de grès déposés par un système fluvial en tresses, avec des indices suggérant que la variabilité du débit était un facteur de contrôle principal de la distribution des faciès sédimentaires et des hétérogénéités. Le modèle de superposition du LGV révèle des périodes où les processus fluviaux étaient absents, et les processus éoliens dominaient le transport et le dépôt des sédiments, constituant 7% de l'épaisseur totale du LGV. Les dépôts éoliens montrent des indications de la présence persistante d'eau dans le système, soit en raison de la montée de la nappe phréatique, soit de crues éphémères. Dans l'association de faciès des chenaux fluviaux, une relation inverse entre

les conditions du régime fluvial et la perméabilité de ses faciès est observée. Dans l'association de faciès déposés par le vent et l'eau (WWL), la distribution de la perméabilité est directement influencée par les conditions climatiques, où des feuilles de sable hybrides à faible perméabilité ont été déposées dans des conditions plus humides, et des dunes éoliennes à haute perméabilité dans des conditions plus arides. Cependant, malgré la haute perméabilité des dunes éoliennes, l'architecture des WWL implique un faible potentiel de connectivité. La compaction est le principal processus influençant la perméabilité et la porosité du LGV. Les échantillons avec une proportion plus élevée de lithoclastes et d'argile infiltrée ont enregistré un degré de compaction plus avancé, tandis que les échantillons avec un pourcentage plus élevé de surcroissance de quartz ont montré un degré de compaction moindre. La surimpression diagénétique a affecté les différents faciès de manière distincte, indiquant que les processus et l'architecture sédimentaires primaires régissent la distribution des hétérogénéités de perméabilité dans le LGV. Les données de perméabilité provenant des affleurements ont montré des valeurs médianes jusqu'à trois ordres de grandeur plus élevées que celles des données de subsurface. Cependant, les mêmes faciès, et des tendances similaires des réponses porosité-perméabilité relatives aux différents faciès, sont observées entre les affleurements et les échantillons de forage, mettant en évidence la sédimentologie comme un proxy indispensable pour les études d'hétérogénéité des réservoirs.



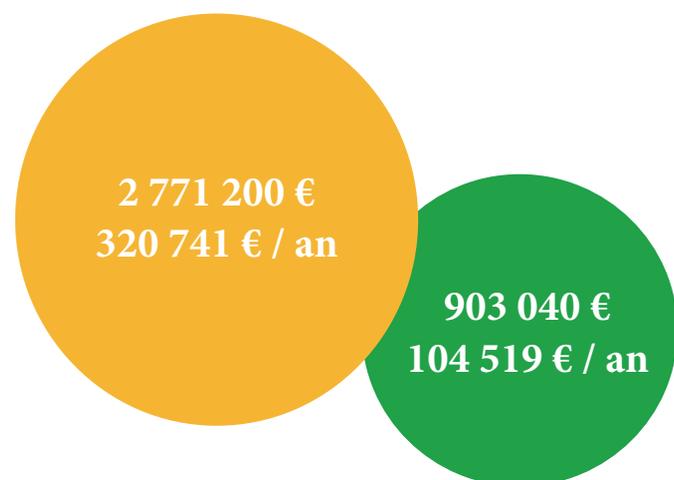
Accueil étudiants, jeunes chercheurs et jeunes ingénieurs

Au cours des années 2023 et 2024, l'ITI GeoT a financé l'accueil de 16 doctorants, 6 post-docs, 24 étudiants en stage et 3 jeunes ingénieurs.

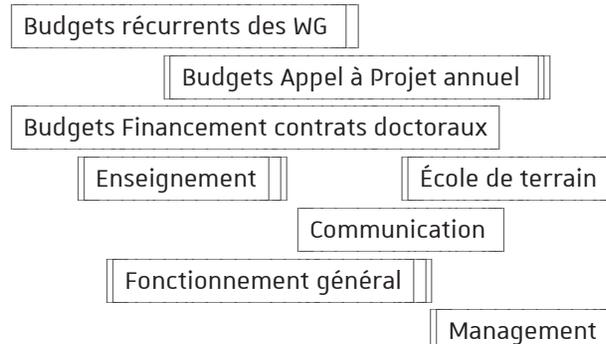
Noms	Poste	WG	Superviseur
Kamel Drif	Doctorant	WG1	O. Lengliné
Dariusz Javani	Doctorant	WG9	J. Schmittbuhl
Weiwei Shu	Doctorant puis post-doctorant	WG1/9	O. Lengliné & J. Schmittbuhl
Rémi Fiori	Doctorant	WG1	J. Vergne
Lucas Bofill	Doctorant	WG6	G. Bozetti
Yuanliang Wang	Doctorant	WG1/9	J.Schmittbuhl, D. Zigone & O. Lengliné
Flavien Mattern	Doctorant	WG1	J. Vergne & J. Schmittbuhl
Rachit Gautam	Doctorant	WG1/9	J. Schmittbuhl
Gabriela Knoblock	Doctorante	WG6	M. Schuster & G. Bozetti
Anna Wallentin	Doctorante	WG5	Damien Lemarchand & Jesica Murray
Malik Abdullayev	Doctorant	WG6	J.F. Chienne & G. Bozetti
Sarvar Mammdov	Doctorant	WG4	P. Baud
Kamal Bayramov	Doctorant	WG4	M. Heap
Jérôme Arnaud	Doctorant	WG7	P. Chavot
Kamal Ahmadov	Doctorant	WG1/9	J. Schmittbuhl
Morgane Platon	Doctorant	WG7	P. Chavot
Jesica Murray	Post-doctorante	WG5	D. Lemarchand
Javier Abreu Torres	Post-doctorant	WG1/9	V. Mangenenet & J. Schmittbuhl
Zhiwei Wang	Post-doctorant	WG1/9	O. Lengliné & J. Schmittbuhl
Riccardo Minetto	Post-doctorant	WG1	O. Lengliné & J. Schmittbuhl
Philippe Danré	Post-doctorant	WG1	O. Lengliné
Mathieu Turlure	Ingénieur	WG1	M. Grunberg
Salsabyl Benlalam	Ingénieure	WG8	B. Derode
Sébastien Mess	Ingénieur	WG1/8	M. Grunberg & B. Berode
Mohamed Mehdaoui	Stagiaire M2	WG1	M. Turlure
Kamal Ahmadov	Stagiaire M2	WG1	J. Schmittbuhl
Quentin Weber	Stagiaire M2	WG1	O. Lengliné
Blandine Chotard	Stagiaire M2	WG3	J-F. Girard
Alexis Aparicio	Stagiaire M2	WG4/6	P. Baud & M. Schuster
Rustan Sadikhov	Stagiaire M2	WG6	G. Bozetti & G. Knoblock
Orian Lempereur-Castellu	Stagiaire M2	WG7	P. Chavot
Karamoko Lamine Gbane	Stagiaire M2	WG7	P. Chavot
Mohand Kecili	Stagiaire M2	WG9	J. Lin & V. Tinard

Bilan financier

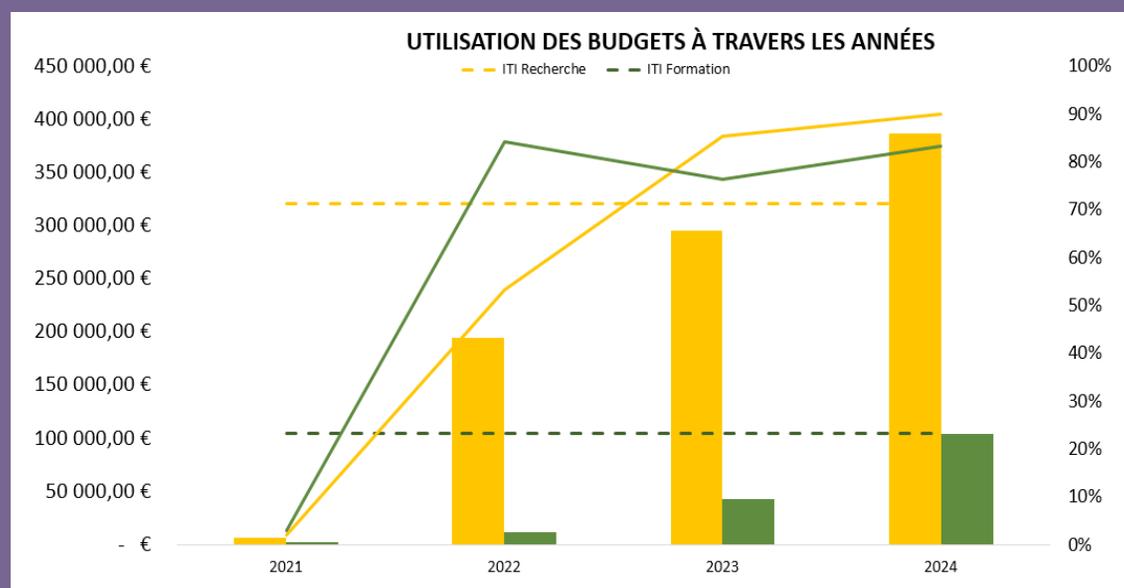
L'ITI GeoT, c'est en tout un financement sur 8 ans à hauteur de 2 771 200 € pour la partie recherche et 903 040 € pour la partie formation. A cela s'ajoute les financements supplémentaires obtenus dans les cadres des projets externes.



L'ensemble de ces budgets se répartissent entre plusieurs axes de dépenses à savoir :



En 2023 et 2024, il a été alloué les sommes suivantes :

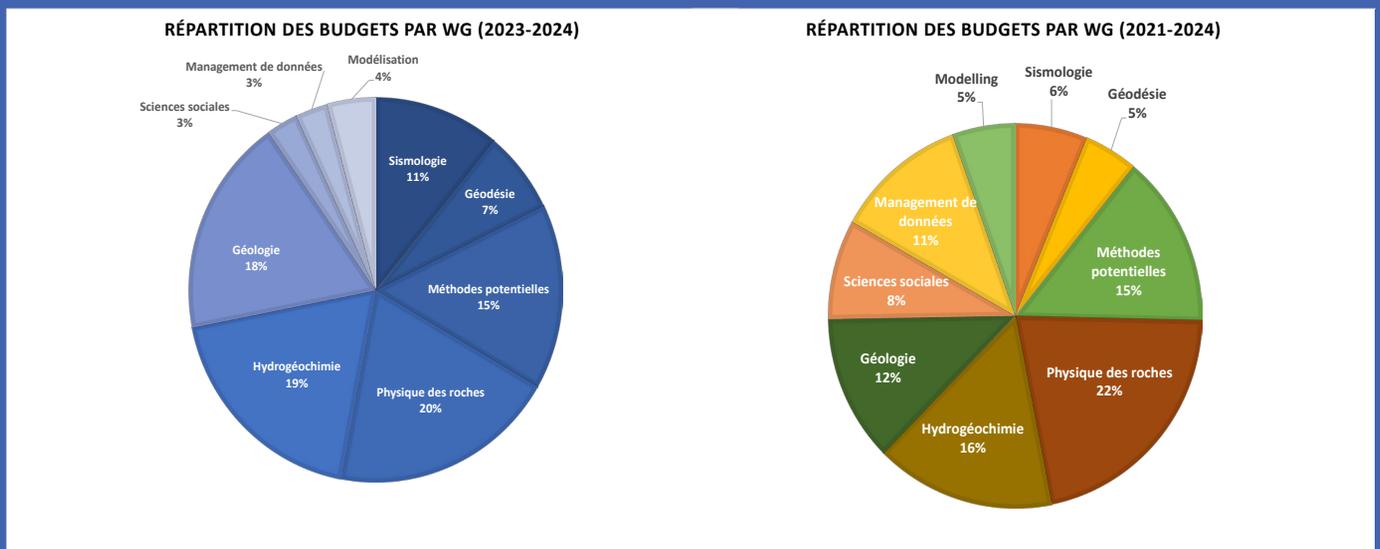


En 2023 et 2024, nous observons une montée en puissance des actions de l'ITI GeoT notamment à travers l'utilisation des budgets alloués à la recherche (jaune) et à la formation (vert). Nous notons une augmentation du pourcentage d'utilisation des budgets (courbes pleines) et de l'utilisation en somme € (histogrammes) se rapprochant des budgets théoriques annuels (courbes pointillées).

Répartition des budgets

Notre comité de direction est composé du directeur, du co-directeur et du manager de projet afin d'assurer les activités opérationnelles, la communication au sein de l'ITI, la gestion des équipes ainsi que la gestion du budget. Dès le début, il a été décidé que chaque WG recevrait une **allocation récurrente annuelle** de 5 000 € à utiliser comme bon lui semble dans le cadre de son WG à quoi s'ajout un **appel à projet annuel** ainsi qu'un **appel à financement de thèse annuel**. L'ensemble des membres de l'ITI GeoT peuvent candidater à ces différents appels. Ainsi depuis le début, nous comptons un pourcentage de primo-lauréats de plus de 60 % pour tous les projets et de 90 % pour les projets interdisciplinaires (inclue au moins deux WGs). Les bourses de doctorat sont largement attribuées entre tous les WGs afin de favoriser l'ensemble des membres. Cette organisation est bien adaptée et fonctionne. Les actions et décisions sont réparties entre plusieurs comités ayant des rôles spécifiques afin d'assurer une transparence totale et une équité dans la distribution du budget et des ressources.

- Notre comité exécutif (**COMEX**), composé de la direction et de tous les WGs leaders, est chargé d'exécuter les décisions prises et les recherches, de rendre compte des activités scientifiques ou éducatives, de proposer des collaborations entre les WGs, ainsi que de suggérer de nouvelles collaborations externes.
- Notre comité de pilotage (**COFIL**), composé de tous les représentants du consortium ITI GeoT (UMRs, école doctorale, master) et veille à toutes les décisions relatives à la stratégie et à l'utilisation du budget (en prenant en compte les recommandations du COS).
- Notre comité d'orientation scientifique (**COS**), composé de douze chercheurs internationaux renommés (Autriche, Belgique, Allemagne, Pologne et France) experts dans leur domaine, se réunit une fois par an pour évaluer la direction scientifique et éducative de l'ITI GeoT, ainsi que les propositions soumises dans l'appel annuel à projets. Chaque année en octobre, il délivre un document d'évaluation listant ses avis et recommandations communiqué au COFIL et au COMEX.



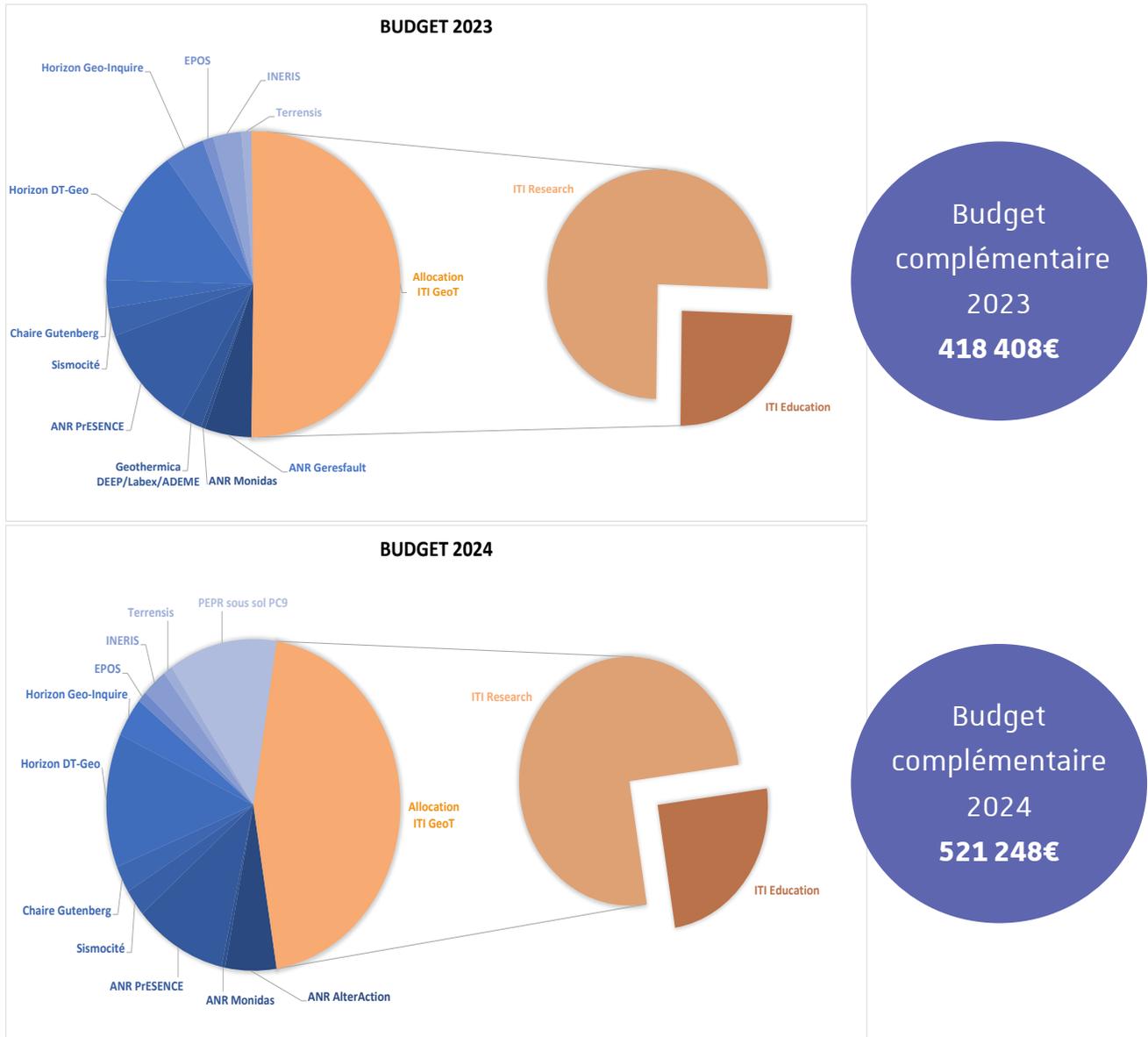
ci-dessus, la répartition en (%) des budgets alloués à chaque WG (budget récurrent + appel à projet) pour les années 2023 et 2024 ainsi que depuis le début de l'ITI GeoT à aujourd'hui 2021-2024

A noter, les WG démontrant un pourcentage inférieur aux autres sur les budgets alloués en tenant compte des appels à projet annuels obtiennent d'important financements complémentaires à travers les projets associés en faisant partie de consortium nationaux et internationaux de grandes envergures (voir ci-dessous et ci-après).

ANR PrESENCe / Sismocité	WG 1 / 7	DT-Geo	WG 1 / 9	PEPR sous sol PC9	WG 1 / 2 / 5 / 6 / 7 / 9
ANR AlterAction	WG 5 / 9	Geo-INQUIRE	WG 8 / 1 / 2	EPOS TCS - AH	WG 8

Ensemble des budgets annuels

Un effet levier important permet de compléter les budgets annuels de l'ITI GeoT et de soutenir l'ensemble des WG. Ces projets supplémentaires permettent notamment de financer une grande partie des projets interdisciplinaires de l'ITI GeoT. Ces budgets permettent notamment de financer des contrats post-doctoraux et doctoraux ainsi que des contrats d'ingénieurs (voir tableau page xx).



Événements marquants

Janvier 2023. Nouveau site web en ligne geot.unistra et mise en place des réseaux sociaux de l'ITI GeoT.

Janvier et février 2023. Nouveaux partenariats avec INERIS et Terrensis SAS.

Février 2023. L'ITES | ITI Geot est désigné pour coordonner un nouveau projet d'envergure au sein du PEPR sous-sol - Projet Ciblé Fossé rhénan (PC9) en collaboration avec le BRGM sur la période 2023-2030 pour plus de 2 millions €.

Mai 2023. Support du projet étudiants (association TerraNostra) - "Projet de stage de terrain du 5 au 12 juin 2023 - Volcanisme et ressources énergétiques en Guadeloupe"

Juin 2023. Succès de notre campagne de recrutement de nouveaux SismoCitoyen. Plus de 200 demandes ont été reçues dans l'Eurométropole de Strasbourg pour l'installation d'un sismomètre à leur domicile.

Septembre 2023. Ouverture de notre Master en M1 et M2 avec un total de 11 étudiants.

Septembre 2023. Nouveau projet obtenu ANR AlterAction coordonné par l'ISTerre Grenoble. Il sera financé sur 2024-2027 avec plus de 174k€.

De janvier 2024 à juillet 2024. Évaluation du projet ITI GeoT à mi-parcours par l'Université de Strasbourg et un jury international qui a permis la confirmation du projet jusqu'en 2028.

Juin 2024. Finalisation du projet Geothermica-DEEP

Septembre 2024. Entrée de la deuxième promotion de master en M1 et M2 avec un total de 14 étudiants.

Septembre 2024. Nouveau projet obtenu CETP Geotwins coordonné par l'ETH Zurich. Il sera financé par l'ANR sur 2024-2027 avec plus de 325k€.

Décembre 2024. Nouveau site web sismo-citoyen.fr ainsi que la publication de la première Newsletter en lien avec les SismoStammtiscs.

Décembre 2024. Finalisation du projet SismoCité



Témoignages

"L'ITI GeoT m'a permis d'ouvrir mes recherches sur la géothermie profonde en Alsace, un véritable laboratoire naturel qui permet d'enrichir la compréhension des processus observés sur les grandes failles aux limites des plaques tectoniques."

Baptiste Rousset (WG2)



"Le soutien régulier de l'ITI GeoT permet de soutenir des axes de recherche à plus long terme qu'un simple projet. Il a permis de renforcer les moyens instrumentaux et leur maintenance, outils indispensables pour mener ces recherches."

Jean-François Girard (WG3)

"The members of the Rock physics and Geomechanics working group (WG4) have greatly benefited from the ITI GeoT. The ITI GeoT has provided the framework with which to research and teach topics related to the energy transition."

Mike Heap (WG4)



"ITI-GeoT plays a crucial role in our academic work by fostering discussion and collaboration within our institute. It facilitates interdisciplinary interactions, helping to establish and strengthen connections across various fields. Additionally, it provides a competitive and high-level framework through the annual evaluation of projects. The international composition of the evaluation jury ensures a broad, high-quality assessment and review of our scientific work. Moreover, ITI-GeoT enhances access to funding, enabling the acquisition of new equipment and the continuous improvement of our laboratories. It directly funds our research by supporting PhD and Master's students who are directly involved in our projects. At the national level, ITI-GeoT provides opportunities to access national networks, funding, and collaborations. It strengthens partnerships across institutions and facilitates participation in programs such as the PEPR Sous sol PC9 Fosse Rhenan initiative. At the international level it provides a strong visibility and favors the international partnership."

Jesica Murray (WG5)



Témoignages

"ITI funding has been pivotal for the development of our Buntsandstein project, from the personal development of our students, to the international outreach of the project."

Guilherme Bozetti (WG6)



"The GeoT ITI offers me a new and stimulating collaborative framework, allowing me to work on fundamental questions related to societal and local-regional concerns. As for the Buntsandstein project, the Grande Oolite project facilitates a new collaboration between sedimentologists and petrophysicists. This funding also makes it possible to start and develop a research activity on carbonate rocks in Strasbourg."

Mathieu Schuster (WG6)

"ITI GeoT provides and strengthen an excellent environment in our department to teach and perform research on the Energy transition."

Gianreto Manatschal et Marc Ulrich (WG6)



"ITI GeoT allows enhancing our work on societal themes. It helps also to address and work more on the implications of our research (usually profoundly fundamental) for the society. The multidisciplinary aspect is also important, although not directly enrolled in my activities."

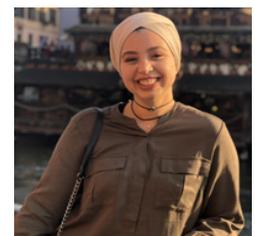
Benoit Petri et Francis Chopin (WG6)

"L'ITI GeoT joue un rôle fondamental dans le renforcement de nos activités au Centre de Données de Géothermie Profonde (CDGP). En tant que centre de données de l'ITI, nous bénéficions d'un soutien essentiel pour la structuration, la gestion et la valorisation des données géothermiques. Les synergies créées avec les groupes de travail de l'ITI GeoT, ainsi que l'accès à des ressources et des expertises pluridisciplinaires, nous permettent d'enrichir nos bases de données et de proposer des outils toujours plus adaptés aux besoins de la communauté scientifique. Avec un aspect plus personnel, l'ITI m'a offert une opportunité unique de développement professionnel. En tant que première expérience dans ce domaine. L'ITI m'a permis d'acquérir des compétences pratiques et d'élargir mes horizons.

Ce qui distingue particulièrement cette expérience, c'est la richesse des interactions avec des membres issus de nombreux groupes de travail. Ces collaborations interdisciplinaires ont été non seulement enrichissantes intellectuellement, mais elles m'ont également permis de développer une compréhension plus globale des dynamiques de recherche.

Enfin, l'ambiance au sein de l'ITI est un réel atout. Les moments de convivialité réguliers créent un environnement de travail agréable et motivant. Cette expérience me permet de grandir, à la fois professionnellement et humainement."

Salsabyl Benlalam (WG8)



Lieu

Ecole et observatoire des sciences de
la Terre | EOST
5, rue René Descartes
67084 Strasbourg

Contact

iti-geot-contact@eost.unistra.fr

geot.unistra.fr

 *Follow us @itigeot*

