



LA LETTRE DE L'ÉOST

NSPÉCIAL JUILLET 2021

LETTRE D'INFORMATION
DE L'ÉCOLE ET OBSERVATOIRE
DES SCIENCES DE LA TERRE
eost.unistra.fr



École et observatoire

des **sciences de la Terre**

Université de Strasbourg et du 



SOMMAIRE

LabEx G-eau-thermie Profonde : objectif, missions, partenaires, budget et RH	3
ITI GeoT	5
Chaire industrielle de géothermie profonde	6
Recherche	
Sismologie	8
Magnétotellurie-gravimétrie	10
Physique des roches	12
Hydrogéochimie	14
Géologie	16
Modélisation	17
Sciences sociales	18
Communication	19
Observatoire	
Sismologie	20
Centre de données	22
Formation	
Thèses	23
Post-doctorat et module Eost	24

DIRECTEURS DE LA PUBLICATION Frédéric Masson, Jean Schmittbuhl
COORDINATION Alexandra Kushnir
RÉDACTION Stéphanie Robert, sauf mention contraire
REALISATION Véronique Bertrand
IMPRESSION Imprimerie DALI / UniStra
PHOTO DE COUVERTURE Centrale géothermique de Rittershoffen. Crédits : Nolwenn Portier

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

NSPECIAL JUILLET 2021

CHÈRES ET CHERS COLLÈGUES,

Nous publions aujourd'hui un numéro spécial de la lettre de l'Eost, dédié au bilan du Labex G-eau-thermie Profonde. Ce numéro rappelle l'origine de ce Labex né il y a une dizaine d'années, présente de très nombreux résultats de recherche et souligne l'impact important du Labex sur les services nationaux d'observation (SNO) gérés par l'Eost ainsi que sur la formation.

Le Labex et les nombreux contrats de recherche associés (Europe-H2020, ANR, Ademe, compagnies privées, ...) ont permis de développer des programmes de recherche ambitieux en finançant équipements, missions et personnels (doctorants, post-doctorants, ingénieurs). Au début du Labex, la géothermie était principalement étudiée par les équipes de sismologie. Aujourd'hui géophysiciens, géologues, hydrologues, géochimistes, modélisateurs et chercheurs en sciences humaines ont rejoint les sismologues ; un nombre très important des chercheurs de l'Eost et d'autres laboratoires travaillent sur ce sujet.

Le Labex a aussi conduit à une modification des contenus de nos enseignements, avec l'introduction de cours sur la géothermie.

Enfin le Labex a permis de développer les réseaux d'observation sismologique (installation de nouvelles stations dans le Fossé Rhénan, classiques et low-cost) et géodésiques (stations GNSS sur les sites géothermiques). Le lien entre le BCSF-RéNaSS (SNO chargé de la caractérisation de la sismicité française) et les autorités de l'Etat a été renforcé. En effet, l'Etat se tourne de plus en plus vers le BCSF-RéNaSS et les équipes de l'Eost pour les questions de surveillance sismique des réservoirs géothermiques.

Le Labex a eu un effet transformant pour l'Eost. A une époque où les énergies fossiles étaient encore au cœur des thématiques de l'Eost autant en recherche qu'en formation, il a mis l'accent sur la nécessité d'une révision de nos modèles en mettant en avant une énergie renouvelable, la géothermie, pour le développement de laquelle la mobilisation des compétences de l'Eost était indispensable.

Ce sont pour des projets comme le Labex que les OSU (Observatoire des Sciences de l'Univers) comme l'Eost prennent tout leur sens. En regroupant recherche d'excellence au sein des laboratoires de recherche, expertise dans l'observation de la Terre et formation, ils sont les structures parfaites pour travailler en synergie sur une thématique transverse.

Aujourd'hui l'ITI GeoT (Institut Thématique Interdisciplinaire – Géosciences pour la transition énergétique) prend la suite du Labex depuis le 1er janvier 2021. L'ITI GeoT propose une réponse innovante et interdisciplinaire aux enjeux scientifiques, économiques, environnementaux et sociétaux, pour relever les défis actuels liés à la large utilisation du sous-sol dans la transition énergétique. L'ITI est plus ambitieux que le Labex en terme de formation car il comprend un programme international de formation à destination des étudiants de niveau master et doctorat. Nul doute que l'ITI GeoT sera aussi l'un des moteurs de la dynamique de l'Eost dans ses trois missions de recherche, observation et formation dans les prochaines années.

Frédéric Masson, directeur de l'Eost

2012-2020 : 9 ANS DE RECHERCHE, DÉVELOPPEMENT ET FORMATION POUR LA GÉOTHERMIE PROFONDE EN ALSACE

NULLE PART AILLEURS

Le LabEx G-eau-thermie Profonde est né en 2012 pour contribuer au développement de cette nouvelle ressource énergétique, prometteuse pour réussir la transition énergétique. Dans ce territoire qu'est Strasbourg et l'Alsace, la conjonction des facteurs favorables était propice : d'abord, le contexte géologique exceptionnel du Fossé Rhénan avec la présence d'aquifères profonds à haute température, favorables à une exploitation industrielle de la ressource géothermale ; les 30 années de recherche et d'expériences réalisées sur le site pilote de Soultz-sous-Forêts ; les compétences et les investissements industriels, notamment par ES ; la présence d'une école d'ingénieur en géophysique qui forme les futurs professionnels et chercheurs dans le domaine ; la situation transfrontalière favorisant la coopération avec des partenaires allemands. Tous les ingrédients étaient réunis pour enclencher le cercle vertueux. Porté par l'Eost le projet était l'un des 16 lauréats de l'appel à projets LabEx dans le cadre du projet Initiative d'Excellence (IdEx) de l'Université de Strasbourg pour le programme gouvernemental Investissements d'Avenir. Le LabEx est coordonné par l'Université de Strasbourg, en association avec le CNRS.

LES MISSIONS

Le LabEx a été créé dans l'ambition d'accompagner la filière industrielle par un développement des connaissances scientifiques afin d'améliorer l'exploitation des réservoirs géothermiques profonds, de type EGS (Enhanced Geothermal System), à haute température, pour la production d'électricité et de chaleur. Les enjeux scientifiques portent sur les améliorations de l'exploration des ressources géothermales profondes, de leur comportement hydraulique et mécanique, de leur stimulation et leur suivi, de la maîtrise des risques environnementaux et sismiques associés, et de la perception du public. A ce volet scientifique est associé un volet formation pour transmettre ces connaissances aux étudiants de l'Eost via des enseignements spécialisés (modules, diplôme universitaire), ainsi que la mise en place d'un centre de données pour conserver et

diffuser les données, et la valorisation industrielle des connaissances acquises.

LES PARTENAIRES INDUSTRIELS ET ACADÉMIQUES

Le LabEx a été créé en association avec les partenaires industriels ES et le GEIE EMC* à Soultz-sous-Forêts. Ce dernier a été intégré à ES-Géothermie en 2017. ES a été le principal partenaire industriel, rejoint à partir de 2017 par Storengy/EPI et Total. ES et l'Eost se sont associés en 2012 pour créer le Co-GéoS, consortium en géothermie profonde de Strasbourg, permettant la réalisation de projets de collaboration, de prestation et de formation, afin de développer la filière géothermique. Coté recherche académique, l'Eost et ses deux laboratoires - l'IPGS (Institut de physique du globe de Strasbourg) et le Lhyges (Laboratoire d'hydrologie et de géochimie de Strasbourg), aujourd'hui fusionnés dans l'Ites (Institut Terre et Environnement de Strasbourg) - le laboratoire ICube (Sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie) ont été rejoints en 2015 par le Lisec (Laboratoire inter-universitaire des sciences de l'éducation et de la communication), étendant davantage le caractère interdisciplinaire du LabEx.

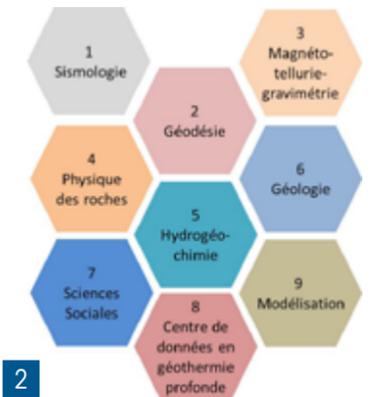
DÉVELOPPEMENT ET STRUCTURATION

Chaque année, un appel à projets annuel permet de sélectionner et financer les travaux de recherche, qui sont réalisés en 18 mois.

D'année en année, le LabEx s'est structuré et développé : en 2015, il s'est organisé en 9 groupes de travail thématiques (voir ci-contre) pour mieux coordonner les activités de recherche ; en 2016, un comité scientifique rassemblant des experts universitaires internationaux a enrichi la gouvernance du LabEx et accru sa notoriété dans la communauté scientifique, et à partir de 2015, il s'est impliqué dans de nouveaux projets de recherche nationaux et européens (voir page suivante la Chaire industrielle de Géothermie Profonde), offrant un accroissement important des moyens.



* Groupement européen d'intérêt économique
Exploitation minière de la Chaleur



Illustrations >

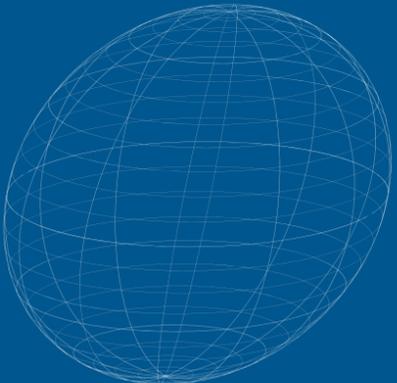
[1] Centrale géothermique de Soultz-sous-Forêts, exploitée par ES, lors de l'inauguration de la phase industrielle en septembre 2016. Crédits : J. Schmittbuhl
 [2] Les 9 groupes de travail thématiques créés en 2015 pour structurer les activités de recherche. « Cette structure clarifie les activités du LabEx et permet de maintenir des liens forts et étroits entre ces groupes » selon l'avis du Comité scientifique international.

« Il est clair que l'existence et l'organisation du LabEx est un "plus" important pour l'Université de Strasbourg qui a permis d'accroître la force et la reconnaissance de l'Eost aux niveaux national et international »

Le Comité scientifique international

« L'obtention de ce LabEx contribue à l'excellence scientifique de l'Eost, soutient des actions d'observation régionales et des actions de diffusion des savoirs. »

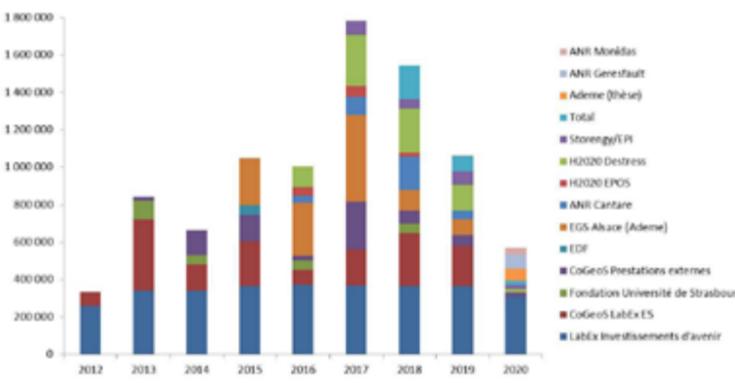
Le Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (HCERES).



PLUS DE 8,8 MILLIONS D'EUROS EN 9 ANS

La dotation ministérielle pour le LabEx G-eau-thermie Profonde s'élève à 3 millions d'euros sur 8 ans.

Le financement d'ES dans le cadre du CoGéoS s'élève à 1,7 millions d'euros et 350 000 euros de mécénat avec la Fondation Université de Strasbourg. A cela s'ajoutent les financements ANR, Ademe et de la Commission Européenne pour les projets nationaux et européens. Ainsi, le LabEx a permis de générer presque 9 millions d'euros de recettes et dotations en 9 ans (voir ci-contre).



PRÈS DE 200 PERSONNES IMPLIQUÉES

Le LabEx G-eau-thermie profonde est avant tout un projet humain dans lequel se sont impliquées 198 personnes entre 2012 et 2020 : chercheur.se.s, enseignant.e.s-chercheur.se.s, ingénieur.e.s, technicien.ne.s, doctorant.e.s, post-doctorant.e.s... La répartition de leur fonction est indiquée ci-contre. En moyenne annuelle, 90 personnes étaient impliquées dans le LabEx, correspondant à 30 équivalent temps-plein. Ils travaillent à l'Université de Strasbourg, au CNRS, chez ES (et GEIE EMC), et dans les établissements d'enseignement supérieur et de recherche partenaires comme le KIT (voir ci-dessous). La réussite du LabEx tient à leur implication et leur engagement, qu'ils en soient ici tous vivement remerciés.

Personnes impliquées	90
Equivalent temps plein	30
Fonction (%)	
Enseignant.e.s-chercheur.se.s	30
Doctorant.e.s	13
Chercheur.se.s	9
Post-doctorant.e.s	7
Ingénieur.e.s, assistant.e.s, technicien.ne.s	41
Appartenance (%)	
Université de Strasbourg	61
CNRS	19
ÉS	11
Etablissements partenaires	9

Abdelfettah Yassine - Achauer Ulrich - Ackerer Julien - Ackerer Philippe - Aichholzer Coralie - Ajak Fanny - Allard William - Anceul Julie - Armando Yves - Arnaud Jérôme - Azzola Jérôme - Baud Patrick - Baujard Clément - Begriche Ghénima - Bellahcene Abderrahman - Bernard Jean-Daniel - Bertrand Véronique - Bes de Berc Maxime - Bitri Adnand - Blachet Antoine - Blumentritt Hervé - Bodin Cyrille - Bosia Clio - Boubacar Mohamed - Boutin René - Boy Jean-Paul - Brendlé Jean-Marc - Breguier Florent - Broucke Céleste - Cacciolo Andréa - Calmès Emmanuelle - Calvo Marta - Campillo Michel - Carbillat Lucille - Cauchie Léna - Chabaux François - Chambodut Aude - Chavot Philippe - Chopin Francis - Clément Alain - Cornet François - Cuenot Nicolas - Dalmais Eléonore - Dauny Frédéric - Daval Damien - De Freslon Nawal - Deng Qinglin - Desbrandes Marie - Diamant Michel - Doubre Cécile - Dretzen Rémi - Drif Kamel - Duputel Zacharie - Durringer Philippe - Engels Fabien - Farquharson Jamie - Ferhat Gilbert - Fisher Tomas - Fond Christophe - Fremand Alain - Frémand Alice - Fritz Bertrand - Gaucher Emmanuel - Genter Albert - Girard Jean-François - Girard-Berthet Violaine - Glaas Carole - Gourmelen Noël - Graff Jean-Jacques - Greenhalgh Stewart - Grellier Clément - Griffiths Luke - Grunberg Marc - Hansen Alex - Harlé Pauline - Heap Michael - Hector Basile - Hehn Régis - Heimlich Christine - Held Sebastian - Henrion Eric - Hernandez Alain - Hillers Gregor - Hinderer Jacques - Humler Eric - Imbs Benoît - Imfeld Gwenaél - Jacob Mathilde - Jahn Markus - Javani Dariush - Jeltsch Jean-Marc - Justin Camille - Jousset Philippe - Jund Hélène - Jung Cindy - Karabulut Hayrullah - Kathwinkel Yassin - Kempf Bernard - Kinnaert Xavier - Knauss Kevin

- Kohl Thomas - Köpke Rike - Kula Damian - Kushnir Alexandra - Lack Roger - Lambotte Sophie - Lamourrette Lucie - Lançon Olivier - Larnier Hugo - Lazarus Caroline - Le chenadec Adrien - Ledig Jacques - Lehujeur Maximilien - Lemarchand Damien - Lengliné Olivier - Littel Frédéric - Lucas Yann - Maggi Alessia - Magnenet Vincent - Malet Jean-Philippe - Maman Koumba Gilles - Manatschal Gianreto - Marakchi Karim - Marthelat Jean-Michel - Martinez Luis - Masseran Anne - Masson Frédéric - Matthey Pierre-Daniel - Maurer Vincent - Million France - Mochel Thiébaud - Mombrou Mylène - Morvan Gilles - Muel Julie - Murray Jessica - Ngo Van-Viet - Pagnot Guillaume - Paolo Théophile - Patrier Patricia - Perrone Thierry - Pestourie Romain - Peterschmitt Abigaëlle - Pollet-Villard Marion - Portier Nolwenn - Ravier Guillaume - Reiser Fabienne - Renaudie Bertrand - Renaud Alexandra - Reuschlé Thierry - Riccardi Umberto - Richard Alexandre - Rihs Sophie - Robert Stéphanie - Rogister Yves - Rohmer Ophélie - Rosat Séverine - Rose Peter - Sailhac Pascal - Saldi Giuseppe D. - Satgé Quentin - Sausse Judith - Schäfer Gerhard - Schaming Marc - Scheiber Julia - Schill Eva - Schmelzbach Cedric - Schmittbuhl Jean - Serrano Yeny - Shu Weiwei - Slaimia Nabil - Steyer Alain - Stormo Arne - Tartat Timothée - Thomas Alexia - Trebaol Alexis - Turlure Mathieu - Ulrich Marc - Ulrich Patrice - Vallier Bérénice - Van Der Woerd Jérôme - Vergne Jérôme - Vermorel Simon - Vidal Jeanne - Villadangos Gueric - Vivin Lilas - Vylcou Neonyla - Wang Fei - Warden Sheldon - Whitechurch Hubert - Wild Bastien - Willig Laurine - Wodling Hervé - Wolf C. - Wynants Nicolas - Younes Anis - Zaeffel Alexia - Zaroli Christophe - Zigone Dimitri - Zoungrana Jean

L'ITI GEOT : L'EAU DU SOUS-SOL POUR UNE ÉNERGIE SANS CARBONE

L'ITI GeoT, Institut thématique interdisciplinaire Géosciences pour la transition énergétique, s'inscrit dans la continuité du LabEx G-eau-thermie Profonde en étendant ses activités de recherche et de formation sur le rôle de l'eau profonde du sous-sol dans le développement de ressources énergétiques décarbonées : la géothermie profonde mais aussi la production d'hydrogène, de lithium, le stockage de chaleur ou de CO2...

Il est porté par l'Université de Strasbourg, en partenariat avec le CNRS, dans le cadre de l'Initiative d'excellence «Dépasser les frontières» et du projet SFRI (Structuration de la formation par la recherche dans les initiatives d'excellence) Stra'us, lauréats du programme des Investissements d'Avenir. L'ITI GeoT (Géosciences pour la transition énergétique) est l'un des 15 projets labellisés pour 8 ans (2021-2028) par l'Université de Strasbourg (iti.unistra.fr). La dotation globale est de 3 674 240€ sur 8 ans, représentant un budget annuel global de 450 000 €.

LE CONSORTIUM ITI GEOT

L'ITI GeoT implique l'Eost, l'Ites (Institut Terre et Environnement de Strasbourg), ICube (Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie), le Lisec (Laboratoire Interuniversitaire des Sciences de l'Éducation et de la Communication) avec le Crem (Centre de recherche sur les médiations) et le laboratoire Sage (Sociétés, Acteurs, Gouvernement en Europe), l'École doctorale Sciences de la Terre et l'Environnement et l'IFP School.

RECHERCHE : GÉOTHERMIE ET AUTRES RESSOURCES POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Les travaux de recherche s'orientent selon 5 axes prioritaires, l'objectif étant d'approfondir les connaissances sur : le cas particulier de Strasbourg en géothermie profonde à la suite des séismes induits par le projet de Vendenheim ; l'hydrothermalisme profond qui pourrait permettre d'exploiter la chaleur, de produire du lithium, de l'hydrogène, et de stocker du CO2 ; l'impact de la cicatrization des réservoirs fracturés profonds sur leur perméabilité et sur leurs propriétés, la déformation aismique dans ces réservoirs, et l'avenir du suivi des réservoirs géothermiques profonds. Le premier appel à projets annuel a été lancé en juin 2021 pour financer les travaux de recherche dans ces axes prioritaires à hauteur de 330 000€. Les projets se réaliseront sur 15 mois.

Les travaux s'articulent avec les projets en cours, nationaux (ANR Cantare, ANR Geresfault, ANR Monidas, thèse Ademe), européens (Epos Eric /TCS AH, Geothermica DEEP) et des collaborations industrielles (Storengy, Total et Ineris). A l'instar du LabEx, les activités de recherche s'organisent en neuf groupes thématiques (voir ci-contre les groupes est leurs responsables)

FORMATION : UN NOUVEAU MASTER INTERNATIONAL

L'ITI GeoT voit la création d'un nouveau parcours international, Geosciences for the Energy System Transition, du Master Science de la Terre et des Planètes, environnement (STPE), en partenariat avec l'IFP School. L'ambition de ce parcours recherche est de doter l'Eost d'un master international, et de faire évoluer ses formations vers la transition énergétique. Une grande place sera accordée à la pédagogie par projet. La moitié du temps de formation sera dédiée à la recherche, aux stages de terrains et séminaires. Les cours, dispensés en anglais, seront assurés par l'Eost, ICube, le Lisec et l'IFP School. Il accueillera 10 à 20 étudiants recrutés à l'échelle internationale. La première promotion démarrera à la rentrée 2022.

En savoir plus : geot.unistra.fr et iti.unistra.fr

WG1	Sismologie	Jérôme Vergne, ITES
WG2	Géodésie	Frédéric Masson, ITES
WG3	Méthodes potentielles	Jacques Hinderer, ITES
WG4	Physiques de roches	Mike Heap, ITES
WG5	Hydro-géochimie	Damien Lemarchand, ITES
WG6	Géologie	Gianreto Manatschal, ITES
WG7	Sciences humaines et sociales	Philippe Chavot, LISEC
WG8	CDGP	Marc Schaming, ITES
WG9	Modélisation	Christophe Fond, ICube

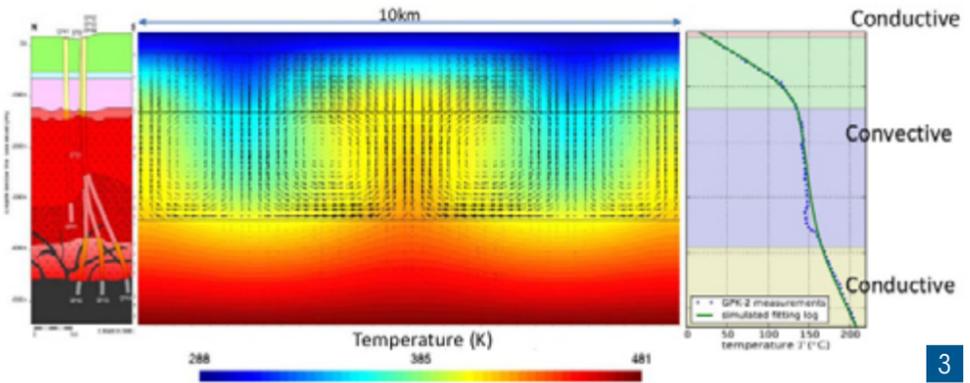


Figure > [3] Le rôle de l'eau profonde dans la recherche et l'exploitation de nouvelles ressources énergétiques sans carbone est l'enjeu central de l'ITI GeoT. Cette modélisation représente la distribution de la température en sous-sol sur le site géothermique de Sultz-sous-Forêts. Crédits : Vallier et al. (2018)

CHAIRE INDUSTRIELLE : LES PROJETS INDUSTRIELS, NATIONAUX ET EUROPÉENS ASSOCIÉS AU LABEX

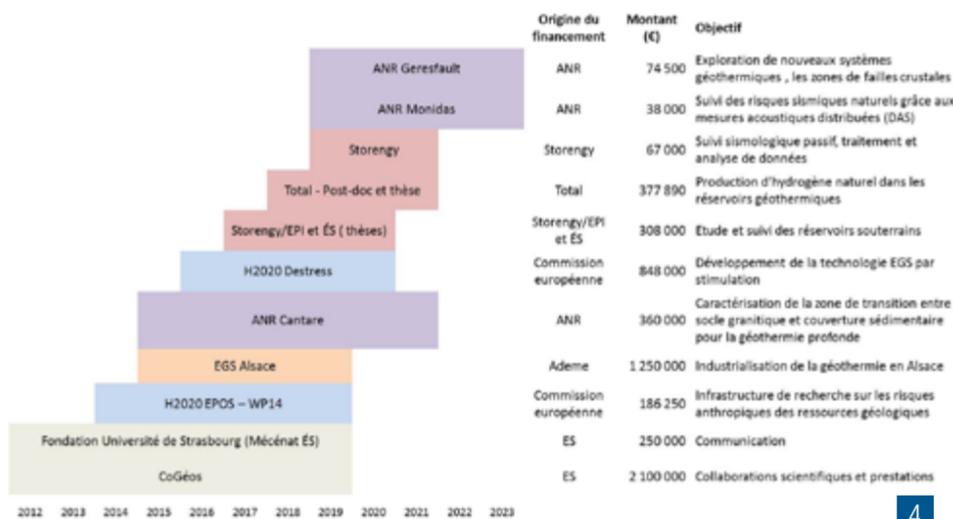


Figure > [4] Les projets et partenariats hébergés par la Chaire de géothermie profonde, l'origine et le montant des financements et l'objectif scientifique poursuivi.

COGÉOS, L'ASSOCIATION DE L'EOST ET ES/ÉS GÉOTHERMIE

Le Consortium en Géothermie profonde de Strasbourg a permis de structurer un important partenariat entre l'Eost et ES/ÉS Géothermie autour de deux objectifs principaux : d'une part, partager et transférer des compétences dans le cadre de collaborations scientifiques pour aller vers un pôle régional reconnu, et d'autre part, structurer une réponse commune pour des prestations vis-à-vis de tiers. Le consortium a particulièrement bien fonctionné puisque 16 conventions spécifiques ont été réalisées en 8 ans avec un budget total conventionné de 1.7 millions d'euros.

Les activités majeures des collaborations scientifiques ont porté sur le co-financement de l'appel à projets du LabEx ; les acquisitions de trois parcs de stations sismologiques (15 stations Taurus pour l'analyse du bruit sismique ambiant et l'imagerie du réservoir, le réseau Densar de 120 stations autonomes de nouvelle génération et le réseau Raspberry Shake pour le projet innovant de sismologie citoyenne) ; l'achat d'une microsonde XRF ; le co-financement de trois thèses (M. Lehujeur, E. Henrion, D. Kula) ; un soutien important pour la gestion des projets (E. Teutsch, A. Cacciolo, C. Jung) ; et la participation à la création du centre de données (CDGP). Les actions de prestation ont, quant à elles, porté sur : le suivi sismologique du site de Rittershoffen (Ecogi) ; la maintenance et la surveillance sismologique sur site de Soultz-sous-Forêts (GEIE EMC) ; le suivi sismologique et géodésique du site d'Illkirch ; les suivis géologiques de forage des sites de Rittershoffen et Illkirch.

Jean Schmittbuhl

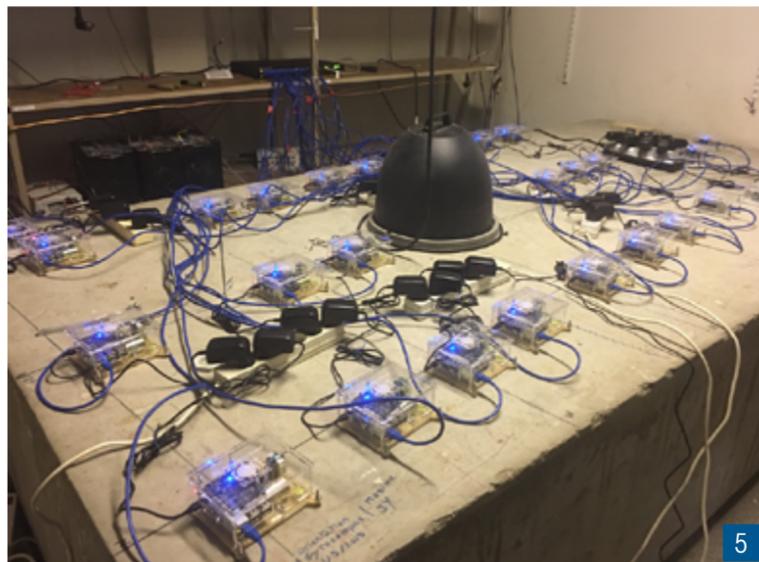


Photo > [5] Le réseau de sismographes Raspberry Shake, installés chez les particuliers dans le cadre du projet de sismologie citoyenne « Un observatoire dans son salon », a été financé par le CoGéoS. Crédits : BCSF-Rénass

5

PROJETS ADEME, ANR ET H2020

Le projet EGS Alsace financé par l'Ademe, coordonné par ES en association avec l'EOST, a été le premier projet associé au LabEx. Avec comme objectif l'industrialisation de la géothermie profonde de type EGS, il a permis des avancées concernant les outils d'exploration, des méthodes innovantes de caractérisation in-situ du réservoir, l'optimisation de l'exploitation, la surveillance sismologique régionale, la perception du public.

Financés par la Commission européenne, le projet H2020 Epos a contribué à la mise en place du CDGP et à son intégration dans

des réservoirs géothermiques, sur site à Soultz-sous-Forêts et en laboratoire. Les deuxièmes ont analysé la perception sociale des projets (voir page 18).

Financés par l'Agence Nationale de la Recherche, le projet ANR Cantare, piloté par le BRGM, s'est attaché à mieux connaître et comprendre la zone de transition entre socle granitique et les bassins sédimentaires profonds pour en déterminer le potentiel géothermique, grâce notamment à des mesures et analyses électromagnétiques et des mesures pétrophysiques.

Enfin, deux autres projets ANR, coordon-



6

Photos >

[6] Kick-off meeting du projet H2020 Destress à Utrecht. Crédits : H2020 Destress

[7] Les ingénieurs d'ES Géothermie et les chercheurs de l'EOST lors d'une campagne sur le terrain pour étudier les affleurements dans le Nord de l'Alsace, dans le cadre du projet ANR Cantare en 2016. Crédits : A. Peterschmitt

CONTRATS INDUSTRIELS : STORENGY/EPI ET TOTAL

Intéressés par les méthodes innovantes développées dans le cadre du LabEx concernant le suivi des réservoirs profonds, deux nouveaux partenaires industriels soutiennent les recherches depuis 2017 en finançant des thèses et post-doctorats. Storengy/EPI et ES co-financent celle d'Eric Henrion (2017-2019), consacrée au suivi géodésique des réservoirs souterrains, et celle de Damian Kula (2017-2020), portant sur le suivi par le bruit sismique ambiant. D'autre part, Total a co-financé le post-doctorat de Jessica Murray (2017-2019) sur la production d'hydrogène naturel dans les réservoirs géothermaux, et la thèse de Dariush Javani (2018-2021) sur la modélisation de la vitesse de l'onde P liée au glissement de faille dans un réservoir fracturé.



7

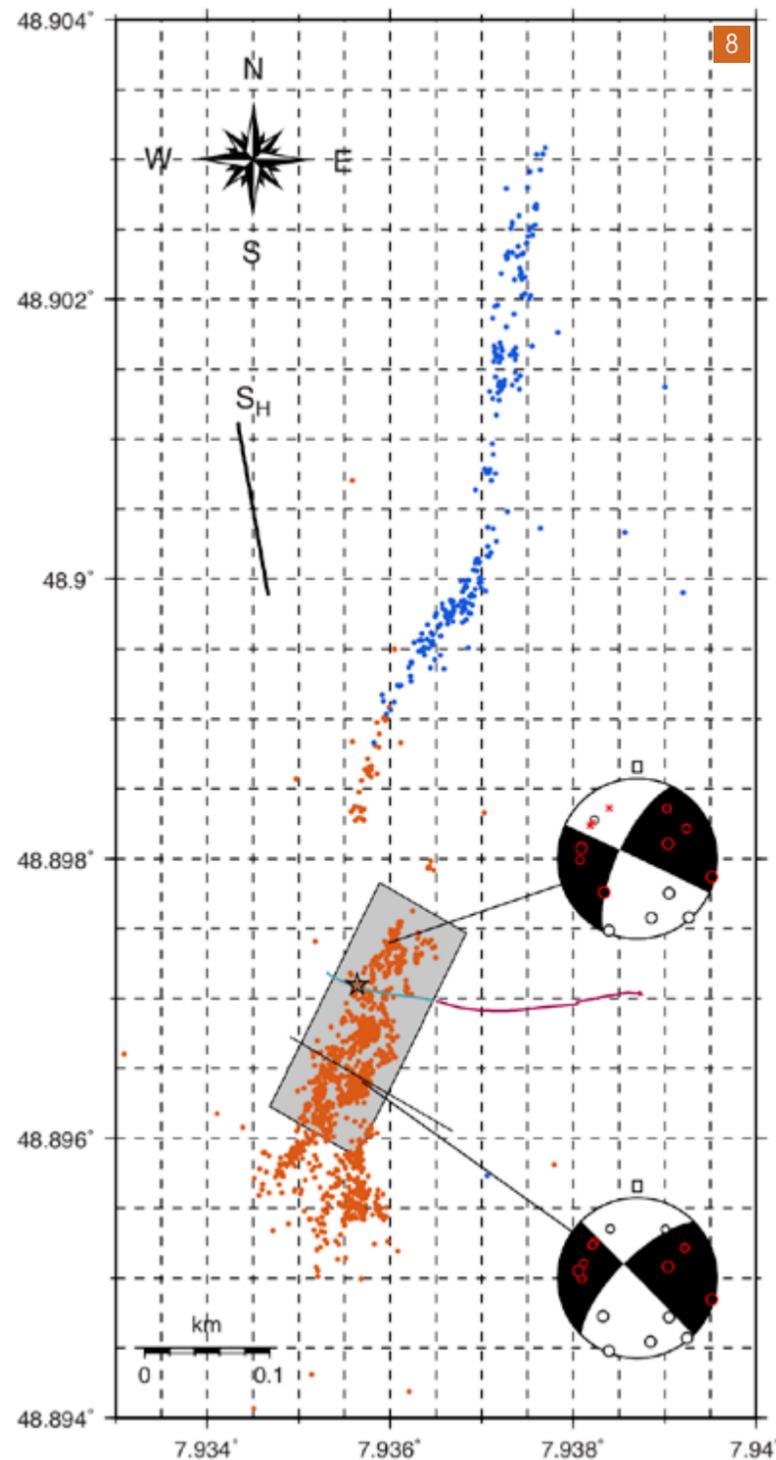
LA SISMOLOGIE : IMAGERIE, SUIVI, CARACTÉRISATION, ET MODÉLISATION DES RÉSERVOIRS PROFONDS

Le groupe « Sismologie » du LabEx a pu développer des méthodes et des outils novateurs pour imager la structure des réservoirs géothermiques profonds ainsi que pour surveiller, caractériser et modéliser leur dynamique et en particulier les processus impliqués dans la génération de séismes induits.

Les travaux du groupe se sont surtout focalisés sur l'analyse de données issues de réseaux sismologiques situés dans l'environnement des sites géothermiques profonds alsaciens via diverses approches de sismologie « passive »¹ couplées à des modélisations numériques ou analogiques. En outre, le groupe a développé un volet plus opérationnel dans le cadre du consortium Cogeos autour de la conception et réalisation de réseaux sismologiques et de chaînes de traitement optimisés pour la surveillance des sites géothermiques. Pour cela le groupe s'est appuyé sur l'expertise existante à l'Est en sismologie observationnelle développée dans le cadre des services nationaux d'observation RLBP, RAP et BCSF-RéNaSS (voir page 20) ainsi que l'expertise de recherche en sismologie fondamentale du laboratoire Ites.

Ces outils ont permis de suivre finement et en temps quasi-réel l'activité sismique autour des différents projets de géothermie profonde à Soultz-Sous-Forêts, Rittershoffen et au sein de l'Eurométropole de Strasbourg. Ils ont abouti à la réalisation de catalogues détaillés (e.g. Maurer et al., 2018) disponibles à travers le CDGP. Ces catalogues ont été encore améliorés à partir d'approches visant à identifier de plus petits séismes dans les enregistrements continus par reconnaissance de formes d'ondes (approches d'IA). La relocalisation

¹ - La sismologie « passive » utilise les enregistrements des vibrations du sol générées soit par des séismes (naturels ou induits) soit par des sources permanentes naturelles ou anthropiques (houle océanique, trafic routier, industries, ...) à l'opposé des méthodes de sismiques « actives » où les sources (marteau, dynamite, camions vibreurs, ...) sont générées.



développée plus largement grâce au projet ANR Présence.

Ainsi, les futurs travaux du groupe viseront à combiner ces nouvelles technologies avec des méthodes optimisées d'analyses de signaux et de modélisations afin d'extraire de nouvelles informations pertinentes permettant de mieux appréhender la complexité et la dynamique des réservoirs profonds et de développer des systèmes visant à limiter le risque sismique induit.

Jérôme Vergne

Figures >

[8] Relocalisation de 1393 séismes lors de la stimulation du puits GRT1 (ligne violette-bleu) sur le site de Rittershoffen en Juin 2013 incluant les séismes s'étant produit pendant la stimulation (orange) et ceux 4 jours après (bleu). Le rectangle gris correspond au plan principal de la sismicité Durant l'injection en accord avec les mécanismes au foyer de 2 séismes. Crédits : Lengliné et al. (2017)

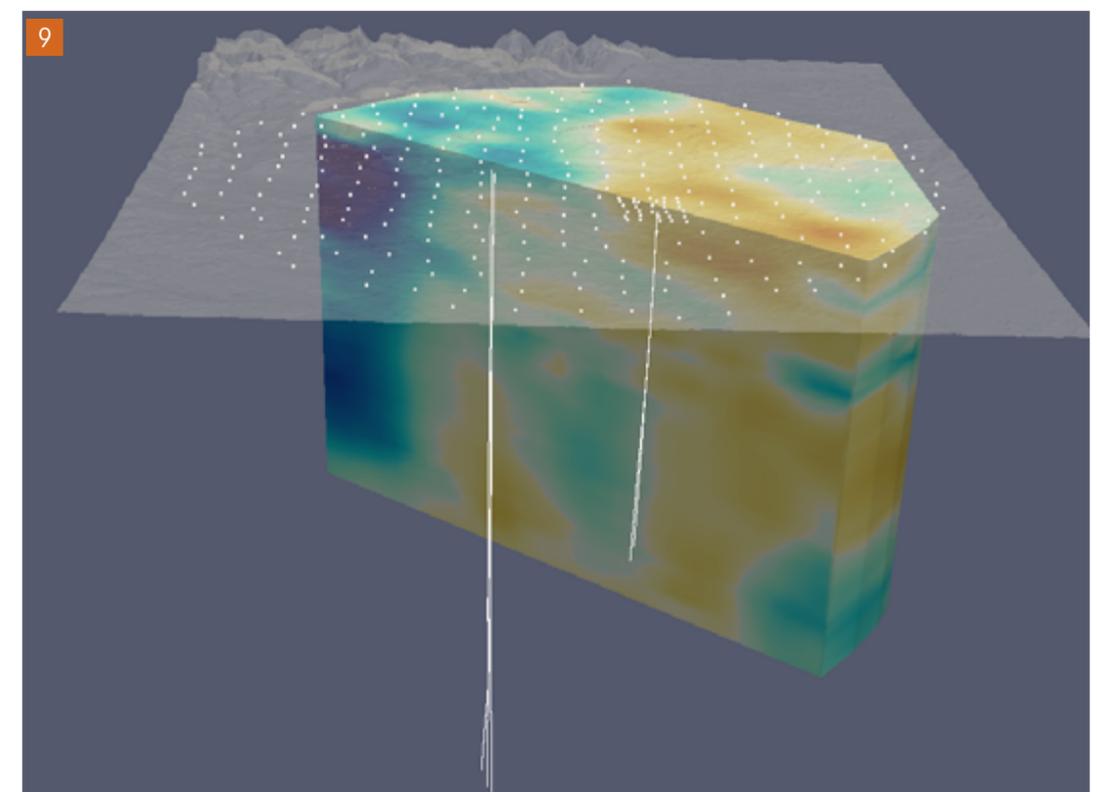
[9] Écorché du modèle tomographique en Vs (jaune = vitesses lentes, bleu = vitesses rapides) de la région de l'Outre-Forêt obtenu par corrélation du bruit sismique ambiant (Lehujeur et al., 2018) à un réseau de 288 capteurs miniaturisés (points blancs) installés en Septembre 2014 dans les environs des forages de géothermie profonde de Soultz-Sous-Forêts et Rittershoffen (puits indiqués par les lignes blanches). Crédits : M. Lehujeur

fine de ces séismes a permis d'illuminer la géométrie complexe des systèmes de failles constituant les réservoirs géothermiques profonds (e.g. Lengliné et al., 2017 [8]). En outre, l'analyse de multiplets (ensemble de séismes correspondant à des ruptures successives de la même aspérité) a permis de mettre en évidence des glissements lents le long de ces failles et d'analyser leur développement (e.g. Cauchie et al., 2020). En complément, des dispositifs expérimentaux en laboratoire ont permis d'étudier la propagation de fractures et le rôle majeur joué par les hétérogénéités (e.g. Jestin et al., 2019).

Le groupe Sismologie a également développé des méthodes basées sur l'enregistrement des vibrations ambiantes et continues du sol (« bruit sismique »), qui permettent d'effectuer des images tomographiques du sous-sol sans utiliser de sources actives (e.g. camion vibreur). Dans le cadre du LabEx nous avons notamment optimisé ces méthodes et réalisé un modèle 3D détaillé de la zone de l'Outre-Forêt révélant des anomalies lentes des ondes sismiques (Vs) associées à la présence de réservoirs géothermiques (Lehujeur et al. 2018 [9]). Ces approches basées sur le bruit ambiant peuvent également permettre un suivi temporel des infimes perturbations de vitesse dans le sous-sol liées aux mouvements de fluides, l'endommagement ou à la dé-

formation élastique du milieu. Ce concept innovant a été validé par des modélisations numériques et analogiques (e.g. Azzola et al., 2020) et testé sur des réservoirs géothermiques et de stockage de gaz dans le cadre d'une collaboration avec ES-Géothermie et Storengy.

Enfin le groupe Sismologie a exploré de nouvelles technologies d'observation dense du champ d'onde sismique. Il s'agit notamment des « nodes », capteurs miniaturisés et autonomes, qui avaient été utilisés pour l'imagerie de la zone de l'Outre-Forêt. À la suite de ce succès nous avons acquis un parc de 120 nodes (Densar- cf. lettre de l'Est n°35) qui a notamment été déployé pour étudier les récents séismes de Strasbourg (autour du site Geoven). Une autre approche se base sur l'utilisation de longues fibres optiques (technologie DAS). Des premiers tests ont été réalisés sur le site d'Illkirch et vont se poursuivre notamment dans le cadre de l'ANR Monidas. Enfin, le groupe a été pionnier dans la réalisation de réseaux denses basés sur des capteurs à bas coût, opérés par des citoyens (« sismologie citoyenne »). Les financements du LabEx, ainsi que de la MITI du CNRS, ont permis de déployer ~60 capteurs de ce type en Alsace qui se sont avérés cruciaux pour suivre la crise sismique de Strasbourg. Cette approche, réalisée en lien avec le groupe Sciences sociales (WG7), va désormais être



MAGNÉTOTELLURIE ET GRAVIMÉTRIE POUR L'EXPLORATION ET LE SUIVI GÉOTHERMIQUES

LE GROUPE SUIT L'ÉVOLUTION DU SOUS-SOL LORS DE L'EXPLOITATION GÉOTHERMIQUE (NOTAMMENT À SOULTZ-SOUS-FORÊTS ET RITTERSHOFFEN) ET EXPLORE LES RESSOURCES PROFONDES GRÂCE AUX MÉTHODES DE MAGNÉTOTELLURIE (MT) ET DE GRAVIMÉTRIE.

CARACTÉRISER ET SUIVRE UN RÉSERVOIR GÉOTHERMIQUE AVEC LA MAGNÉTOTELLURIE

Notre groupe a développé des méthodes innovantes en électromagnétisme pour caractériser et suivre un réservoir géothermique. Les méthodes électromagnétiques à source naturelle (magnéto-tellurique ou MT) ou contrôlée, sont employées pour imager la conductivité électrique du sous-sol, un paramètre sensible à la géologie et à la présence de fluides. Ces méthodes ont déjà fait leurs preuves en milieux volcaniques pour caractériser la géométrie des réservoirs géothermiques et en milieu sédimentaire pour la caractérisation de réservoirs d'hydrocarbures. Cependant, elles sont peu utilisées jusqu'ici pour les réservoirs géothermiques dans des roches fracturées profondes tels que rencontrés en métropole dans des formations de fond de bassin ou

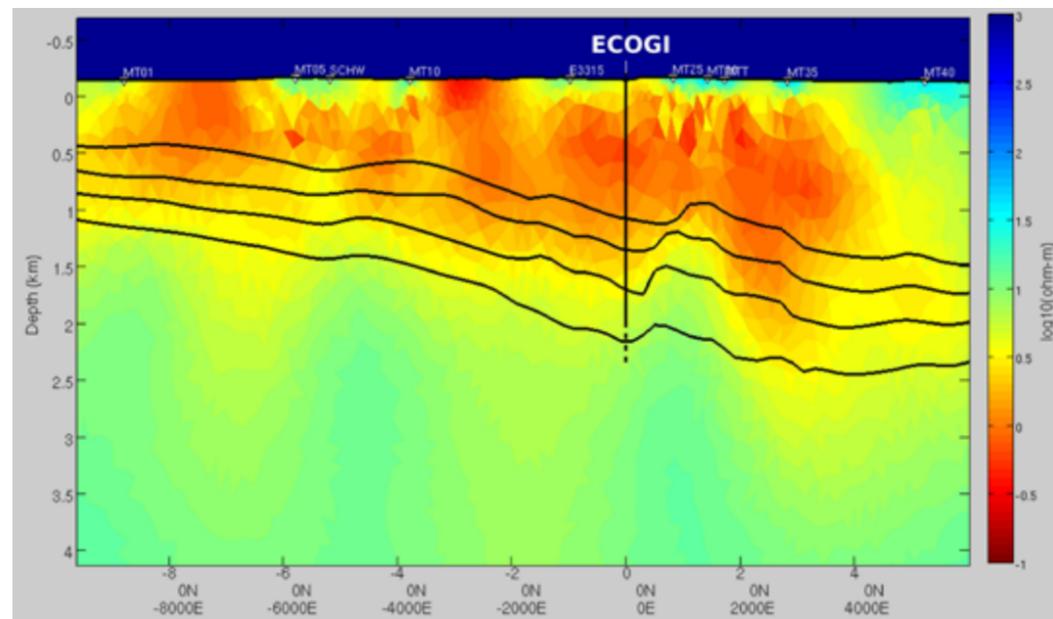
de socle des fossés d'effondrement comme celui du Rhin Supérieur. Comme les cibles visées sont profondes, elles nécessitent d'utiliser des signaux basses fréquences, donc des enregistrements durant plusieurs jours dans des zones généralement fortement urbanisées. Ces mesures souffrent donc de la présence d'un fort bruit électromagnétique et nécessitent l'utilisation de techniques de filtrage avancées. Deux expériences majeures ont été réalisées durant le LabEx près du site Ecogi (Centrale de Rittershoffen). Un profil MT a permis d'imager la pile sédimentaire, comparée avec l'imagerie sismique. Une anomalie conductrice au toit du socle est bien corrélée avec la présence de saumure et les débits trouvés en forage [10]. Par

ailleurs, une campagne de répétition de mesures et un suivi en continu a permis d'évaluer la précision des variations détectables par MT pour un usage en suivi temporel.

Les principaux intervenants étaient Yassine Abdelfettah, Pascal Sailhac, Jean-François Girard, Pierre-Daniel Matthey de l'East et Eléonore Dalmais, Vincent Maurer, Roger Lack de ÉS-Géothermie.

Jean-François Girard

Figure > [10] Profil de résistivité électrique obtenu par l'inversion 2D des données MT (Mare2DEM): en rouge les zones conductrices correspondant aux couches sédimentaires, en noir les principales interfaces géologiques imagées par la sismique. Crédits Y. Abdelfettah (2020)



10

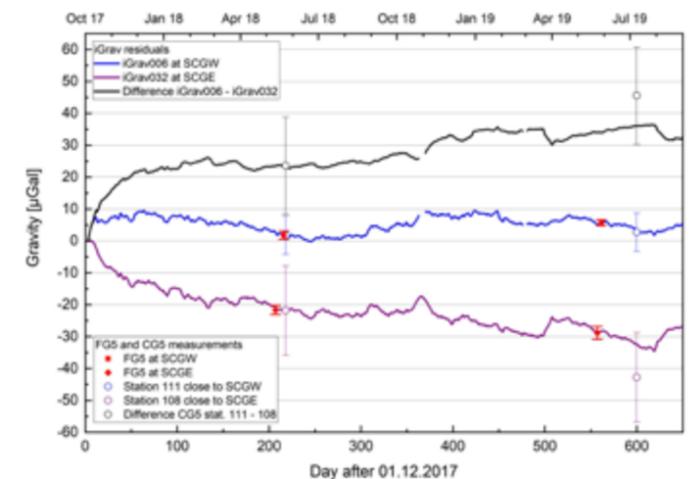
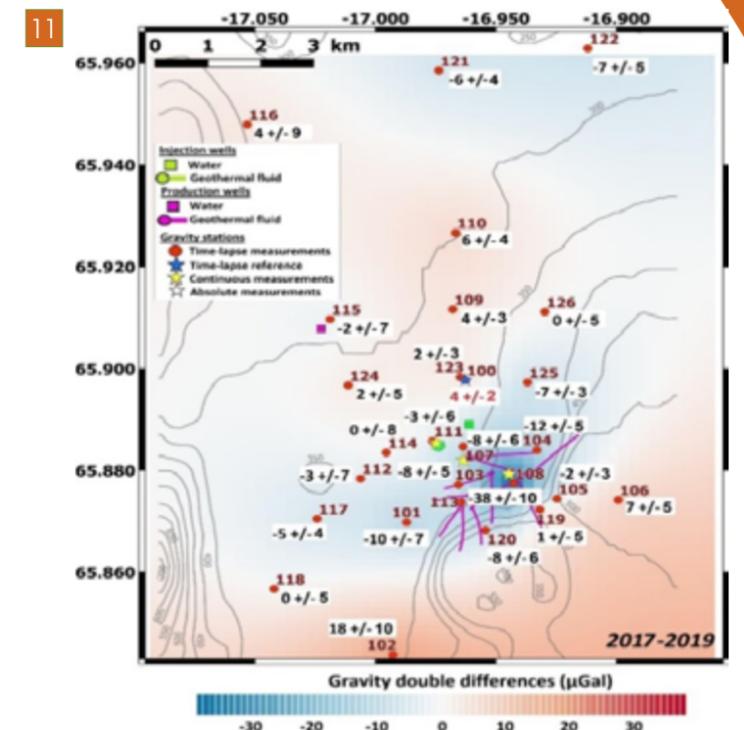
SUIVI GRAVIMÉTRIQUE D'UN SITE GÉOTHERMIQUE EN ISLANDE

Après une étude de faisabilité dans le Fossé Rhénan (à Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen), nous avons eu l'opportunité d'étudier le site de géothermie de Theistareykir en Islande. Cette étude, menée dans le cadre de la thèse de Nolwenn Portier, soutenue en juillet 2020, a commencé à l'été 2017 grâce à une collaboration avec des équipes allemande et islandaise, avant le début de l'exploitation en automne 2017 (première phase de 45 MWe) et printemps 2018 (90 MWe). Grâce à l'emploi combiné de plusieurs types de gravimètres (gravimètres supraconducteurs permanents doublés de mesures de gravimétrie absolue et micro-gravimètres de terrain), nous avons pu réaliser une expérience de gravimétrie hybride afin de déterminer les variations spatio-temporelles de la pesanteur en relation avec l'activité géothermique. Un réseau micro-gravimétrique de 26 stations a été établi, il a pu être remesuré trois fois entre 2017 et 2019, chaque été, à l'aide d'un gravimètre Scintrex CG5 de l'East. Deux gravimètres supraconducteurs ont été mis en fonctionnement par le GFZ Potsdam dans des shelters dédiés dans les zones de production et d'injection. Ces instruments extrêmement précis (10-10 g, où g est la pesanteur moyenne de surface) ont ainsi pu suivre l'évolution de la pesanteur en fonction des débits d'injection et d'extraction du fluide géothermique. Des campagnes de gravimétrie absolue faites à l'aide du gravimètre balistique FG5#206 de l'East ont complété ce dispositif afin de corriger la (très faible) dérive instrumentale des gravimètres supraconducteurs, mais aussi pour déterminer l'évolution de la pesanteur de la station de référence du réseau micro-gravimétrique.

Nos observations détectent de faibles variations dans la zone d'injection (SCGW) au contraire de celles dans la zone de production (SCGE) avec une diminution de g d'une trentaine de μGal (10-8 ms^{-2}) [11]. L'effet différentiel injection -production apparaît clairement et cet effet est également vu par nos campagnes répétées de micro-gravimétrie CG5 aux stations proches des gravimètres permanents. L'interprétation de ces résultats nous conduit à penser que la diminution de g s'explique par l'extraction de fluide en accord avec les masses extraites sur la période analysée (14 Mt). Cette expérience doit néanmoins se poursuivre pour confirmer ce fait et alerter, si nécessaire, sur la faible recharge naturelle de ce réservoir géothermique.

Jacques Hinderer

Figure > [11] Variations résiduelles de gravité d'origine géothermique observées par les deux gravimètres supraconducteurs (iGrav006 et iGrav32), le gravimètre absolu FG5#206 et la répétition de deux campagnes de micro-gravimétrie CG5. Crédits N. Portier (2020)



LA PHYSIQUE DES ROCHES POUR LA CARACTÉRISATION DES RÉSERVOIRS PROFONDS

L'ÉTUDE DE LA MÉCANIQUE (CONTRAINTES, FISSURATION...) ET DE LA PHYSIQUE DES ROCHES (POROSITÉ, PERMÉABILITÉ, CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE ET THERMIQUE...) PERMET DE MIEUX COMPRENDRE LA NATURE DES RÉSERVOIRS ET LES MÉCANISMES DE CIRCULATION DES FLUIDES HYDROTHERMAUX. VOICI DEUX EXEMPLES DE TRAVAUX NOTABLES MENÉS GRÂCE AU LABEX.

INFLUENCE DE LA PRÉCIPITATION DE DIFFÉRENTS MINÉRAUX SUR LA PERMÉABILITÉ D'UN RÉSERVOIR GÉOTHERMIQUE

Dans les systèmes géothermiques, la circulation de fluides dépend beaucoup de la géométrie, de la densité et des propriétés hydrauliques des fractures. C'est le cas notamment à Soultz-Sous-Forêts où un important réseau de fractures a été mis en évidence à la fois dans le granite et dans la couverture sédimentaire, avec des fractures ouvertes ou cimentées par différents minéraux (quartz, illite, calcite, dolomite, barite, etc.). Une étude intégrée (laboratoire et modélisation) a été menée pour quantifier l'anisotropie de la perméabilité dans la couverture sédimentaire, et plus particulièrement l'impact de la précipitation de différents

minéraux sur la circulation de fluide. Les mesures (perméabilité, porosité, analyses des microstructures) ont été effectuées sur des échantillons provenant du puits EPS1. Nous avons montré que la perméabilité des fractures dépend beaucoup des minéraux précipités et du niveau de cimentation. La présence de fractures cimentées, et donc de faible perméabilité, réduit (et parfois annule) l'anisotropie de perméabilité typiquement observée dans le Buntsandstein, du fait de la sédimentation. Un modèle cinétique a été appliqué au cas de la barite pour donner une échelle de temps pour la fermeture totale d'une fracture initialement ouverte. Le taux de précipitation augmen-

tant significativement quand la température du fluide décroît, les risques de précipitations sont particulièrement importants dans les sites géothermiques où la température du fluide peut fluctuer notamment du fait de mélanges près des puits d'injection. Les implications de ces résultats sont donc très importantes pour la modélisation de la circulation de fluide dans les réservoirs géothermiques. Ce travail a été la première collaboration entre le groupe physique des roches (WG4), le LHyGeS et ES-Géothermie, et a fait l'objet d'une publication dans Geothermics en 2016.

Patrick Baud

Vosgian Sandstone

1092m

a



12

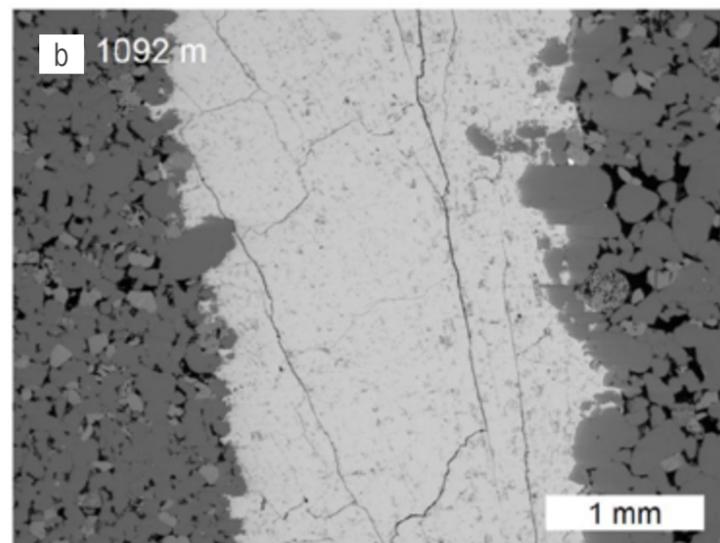


Figure > [12] Fracture verticale remplie de barite dans le Buntsandstein. (a) Photo d'une carotte provenant du puits EPS1 (profondeur 1092m). (b) Détail de la microstructure montrant le remplissage de la fracture par la barite. Crédits : Griffiths et al. (2016)

FISSURATION THERMIQUE DANS LE GRANITE

Pour séparer les effets permanents de la température (fissuration thermique) des effets non permanents (thermo-élastiques) sur la vitesse des ondes P et S, un nouveau dispositif expérimental a été développé à l'Eost dans le cadre d'une collaboration entre les groupes de travail Physique des roches et Sismologie. Il permet des mesures directes des vitesses v_p et v_s jusqu'à 450°C, ainsi que des mesures par interférométrie de la Coda (plus sensibles aux variations de v_s) et l'enregistrement des émissions acoustiques pendant des cycles de chauffage-refroidissement. La première série de mesures a été effectuée sur le granite de Westerly. Lors du premier cycle de chauffage, nous avons observé une forte activité acoustique et une réduction significative (environ 50%) et permanente de v_p . Ceci suggère une fissuration thermique intense pendant le premier cycle, principalement pendant la phase de chauffage. Significativement moins de fissuration thermique a été observée lors des cycles de chauffage suivants, pendant lesquels la réduction apparente des vitesses est pratiquement totalement réversible (voir figure). Ces variations réversibles des vitesses sont dues à l'expansion/contraction élastique des cristaux et à l'ouverture/fermeture associée des microfissures. Nous avons montré comment l'interférométrie de la Coda permet de suivre la fissuration thermique à hautes températures et de mesurer v_s dans le cas d'une fissuration homogène et isotrope. Nos résultats soulignent l'importance des mesures des propriétés phy-

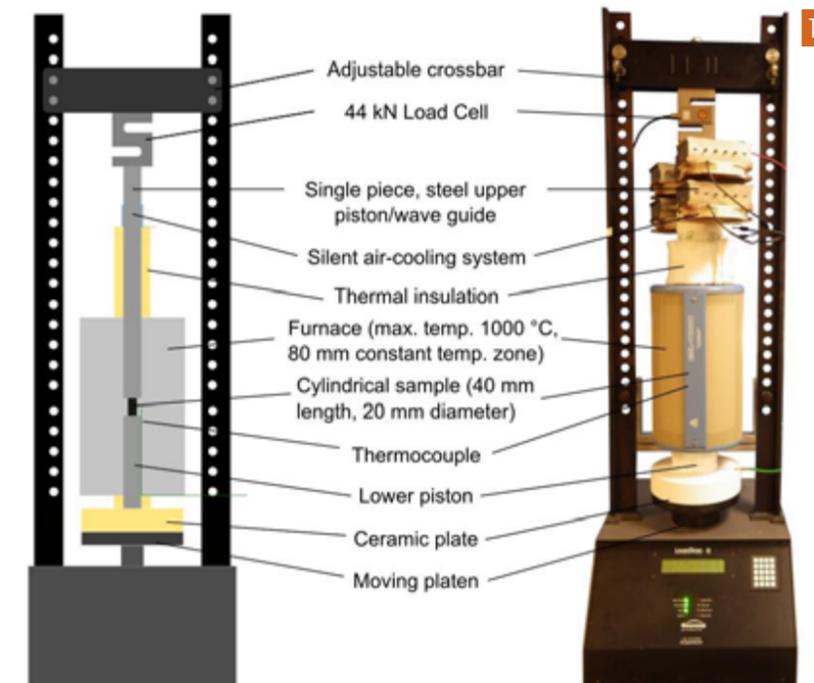
siques des roches aux conditions in situ, notamment pour la compréhension de systèmes dynamiques comme les réservoirs géothermiques. D'autres mesures avec le même dispositif sont en cours sur d'autres types de roches (volcaniques, carbonates) et dans d'autres contextes géothermiques. Ce travail fait partie de la thèse de Luke Griffiths (financée en partie par le Labex). Les résultats ont été publiés dans Journal of Geophysical Research, Solid Earth en 2018.

Figures >

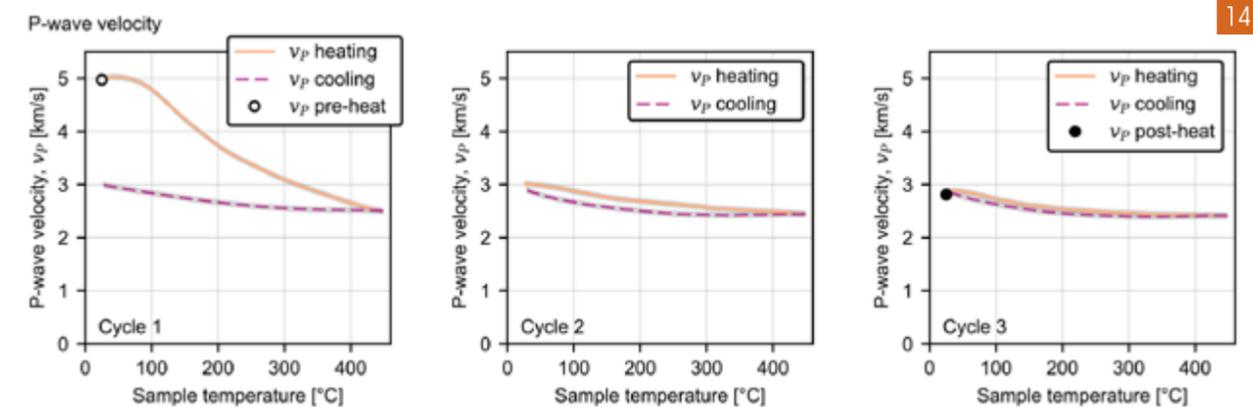
[13] Dispositif pour le traitement thermique sous contrainte. Crédits : Griffiths et al. (2018)

[14] Mesures effectuées au cours de trois cycles de chauffage/refroidissement du granite de Westerly à une température maximale de 450 °C. Les cercles représentent les mesures de v_p effectuées à température ambiante avant et après chauffage. Les lignes représentent l'évolution de v_p par rapport à la température de l'échantillon pendant le chauffage (en continu) et le refroidissement (en pointillés). Crédits : Griffiths et al. (2018)

Patrick Baud



13



14

HYDROGÉOCHIMIE – INTERACTIONS FLUIDES-ROCHES DANS LES RÉSERVOIRS

LES TRAVAUX DE RECHERCHE EN HYDROGÉOCHIMIE ONT, ENTRE AUTRES, CONDUIT À DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX PIONNIERS SUR LA CINÉTIQUE DE DISSOLUTION DES MINÉRAUX DANS LES RÉSERVOIRS, PARAMÈTRE QUI INFLUENCE L'ÉVOLUTION DE LEUR POROSITÉ ET LEUR PERMÉABILITÉ ET DONC LEUR PRODUCTIVITÉ DANS LE TEMPS.

DANS LE CADRE DU PROJET H2020 DESTRESS, DES EXPÉRIENCES EN LABORATOIRE ET DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES ONT ÉTÉ RÉALISÉES, PRÉALABLEMENT À UN ESSAI DE STIMULATION DOUCE DU PUIT GPK4 DE SOULTZ-SOUS-FORÊTS.

ALTÉRATION HYDROTHERMALE DES FELDSPATHS POTASSIQUES À SOULTZ-SOUS-FORÊTS

La modélisation des flux élémentaires impliqués dans l'altération chimique est un processus majeur pour la pérennité d'un site géothermique. Les intensités relatives du lessivage des minéraux primaires et de formation de phases secondaires affectent significativement la porosité et la perméabilité du réservoir, se traduisant par une modification des performances hydrauliques du site, ce qui justifie des efforts de modélisation de ces processus.

Une telle modélisation de l'évolution temporelle de la réactivité minérale se fait classiquement par le biais d'une approche ascendante, que l'on sait peiner à prédire la réactivité des minéraux sur des durées relativement modestes (semaines) et des échelles d'espace pourtant restreintes (cm). L'enjeu consiste à apporter une meilleure connaissance de la réactivité des minéraux typiques du réservoir de Soultz-sous-Forêts (en particulier : feldspath potassique) en conditions hydrothermales. Notre approche repose sur des caractérisations innovantes de nano-topographie de surface lors de la dissolution pour en suivre l'évolution et en déduire des modélisations numériques des processus fondamentaux d'interactions entre les fluides circulant et la roche-hôte.

Nous avons pu démontrer la nature anisotrope de la dissolution du K-feldspath, quelle que soit l'affinité chimique de la réaction. Nous avons mesuré l'impact de l'affinité de la réaction sur différentes orientations cristallines et mis en évidence la déviation entre les mesures pour ces différentes orientations et ainsi faire évoluer le cadre conceptuel utilisé dans les codes de transport réactif. Nous avons élaboré une modélisation numérique de l'évolution de la vitesse de dissolution d'un minéral au cours de la réaction, en lien avec l'évolution de la morphologie des cristaux considérés. In fine, nous avons démontré le besoin de faire évoluer la modélisation classique isotrope de la réactivité minérale.

L'ensemble de ces informations fondamentales donnent un éclairage nouveau et à contre-courant de l'approche conventionnelle de la modélisation de la réactivité minérale, tout en ouvrant la voie à une approche alternative pour appréhender la dissolution des minéraux.

Damien Daval

« Les publications internationales de M. Daval et de ses collègues sont de très haute qualité, avec des recherches de pointe sur la cinétique de dissolution des minéraux. Leurs résultats permettront d'améliorer considérablement les codes [numériques] dans le milieu universitaire et dans l'industrie géothermique, qui utilisaient jusqu'à présent des cinétiques de dissolution minérales inappropriées, voire erronées.

Les travaux géochimiques expérimentaux de haute qualité technique menés par M. Daval et ses collègues sur la cinétique de dissolution du feldspath K, ainsi que ceux réalisés par M. Lemarchand et ses collègues sur les processus de dissolution des minéraux constituent des études très novatrices et prometteuses. »

Avis du Comité scientifique, janvier 2017

STIMULATION DOUCE DES RÉSERVOIRS DE TYPE EGS : EXPÉRIENCES ET SIMULATION (H2020 DESTRESS)

En laboratoire, les différentes séries de tests à l'acide, réalisés entre 2017 et 2019 sur des échantillons de granite analogue à celui du socle profond de Soultz-Sous-Forêts, suggèrent qu'une stimulation basée sur l'utilisation d'acide chlorhydrique reste limitée. L'effet de la stimulation chimique sur la perméabilité et la porosité du granite dépend beaucoup de la microstructure initiale de la roche. Pour un granite non altéré, une augmentation sensible de la porosité et de la perméabilité a été observée, alors qu'elles augmentent légèrement dans le cas d'un granite altéré. Pour des échantillons de granite plus poreux ou naturellement fracturés, une augmentation de la porosité associée à une baisse de la perméabilité a été observée.

De plus, l'évolution de la composition chimique des solutions utilisées dans les stimulations suggère la dissolution de certains minéraux composant le granite, comme l'albite, la biotite et le feldspath. Globalement, les variations de la perméabilité restent faibles dans la plupart des cas, à la fois à température ambiante et à 100°C.

Parallèlement, la modélisation numérique (approche basée sur le code KIRMAT) a montré que la stimulation chimique pouvait augmenter la porosité et la perméabilité du réservoir géothermique sur des zones cependant très limitées (quelques mètres autour du puits), en raison de la forte réactivité de l'acide chlorhydrique. De plus, au-delà, des précipitations et une fermeture

de la porosité sont constatées. Un acide faible pourrait être utilisé afin qu'il puisse pénétrer dans le réservoir géothermique autant que possible.

Les essais de stimulation douce ont été menés en décembre 2019 sur les puits d'injection GPK 4, malheureusement sans grand succès. Les travaux de modélisation ont été décrits dans l'article «Modelling acid stimulation in the enhanced geothermal system of Soultz-sous-Forêts (Alsace, France)» publié dans la revue Geothermics en 2020.

Photo > [15] Centrale géothermique de Soultz-sous-Forêts exploitée par ÉS. Crédits : J. Schmittbuhl.



GÉOLOGIE

LE GROUPE MÈNE DES ÉTUDES STRUCTURALES, MINÉRALOGIQUES, STRATIGRAPHIQUES, SÉDIMENTOLOGIQUES ET GÉOLOGIQUES DE L'INTERFACE SOCLE-SÉDIMENTS DU FOSSÉ RHÉNAN, NOTAMMENT À SOULTZ-SOUS-FORÊTS, RITTERSHOFFEN ET ILLKIRCH.

RECONNAISSANCE DU RÉSEAU DE FRACTURES NATURELLES DANS LES PUIITS DE RITTERSHOFFEN

Mieux comprendre les circulations des fluides dans les réservoirs profonds est un enjeu essentiel dans le cadre des projets de géothermie dans le Fossé rhénan supérieur. L'objectif de nos travaux est la reconnaissance du réseau de fractures naturelles qui canalisent les circulations à l'échelle des deux forages géothermiques profonds GRT-1 et GRT-2 de Rittershoffen qui ont recoupé les sédiments gréseux triasiques et le socle granitique altéré.

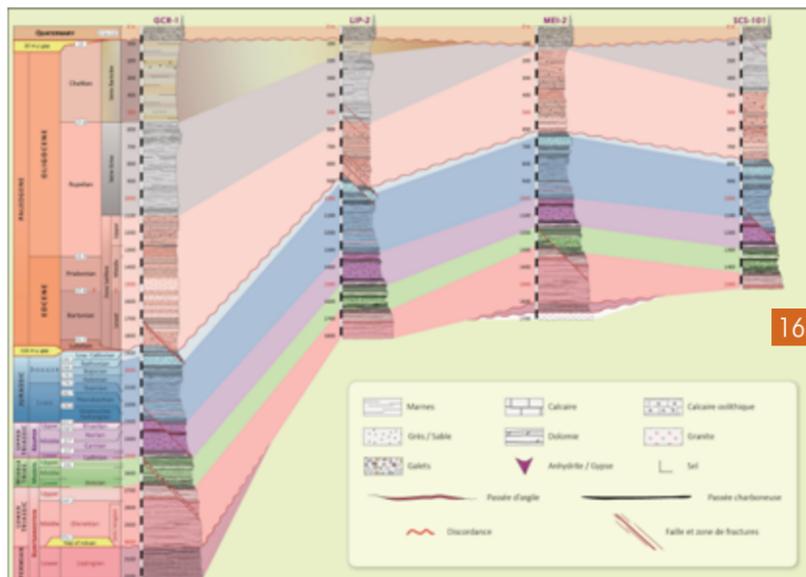
Ces travaux reposent d'une part sur l'étude structurale de ce réseau de fractures à partir d'imageries de paroi acoustiques, corrélées à des diagraphies géophysiques standard et des profils de température, et d'autre part, sur l'étude pétro-minéralogique basée sur la caractérisation des altérations hydrothermales.

Les résultats obtenus montrent des zones de fractures perméables des puits de Rit-

tershoffen avec une organisation asymétrique. Des fractures ouvertes à l'échelle du puits semblent agir comme des drains perméables entourés de halos d'altération hydrothermale. La présence de minéraux d'illite pourrait être un indicateur pour prospector les zones de circulations actuelles et passées à l'échelle des puits.

Cette étude géologique apporte des éléments pour évoluer vers un modèle de réservoir hydrothermal possédant des connexions hydrauliques favorables en amont des opérations de stimulation. Jeanne Vidal a soutenu sa thèse en 2017 « Altérations hydrothermales associées aux zones de fractures à l'interface de la couverture sédimentaire et du socle cristallin dans le Fossé rhénan supérieur. Application aux forages géothermiques de Rittershoffen ».

Figure > [16] Interprétation chronostratigraphique puits à puits de la couverture sédimentaire de la région strasbourgeoise. Crédits : Aichholzer (2019)



LA COUVERTURE SÉDIMENTAIRE RHÉNANE, SA STRATIGRAPHIE ET SON FLUX DE CHALEUR

De nombreuses connaissances géologiques sont primordiales au bon déroulement des projets de géothermie pro-fonde. La connaissance des informations stratigraphiques de la couverture sédimentaire a longtemps été laissée de côté tandis que les études consacrées au réservoir granitique étaient très nombreuses. Néanmoins, la géologie de la couverture sédimentaire est primordiale afin de contraindre la succession litho-stratigraphique précise et les faciès de cette dernière, autant pour la définition de la trajectoire du puits que pour l'implantation des différents forages.

Il est difficile, dans un bassin sédimentaire aussi vaste que celui du fossé rhénan, de réaliser des coupes stratigraphiques de toute la couverture sédimentaire à l'aide seule des affleurements présents sur les épaules du rift et ses champs de fractures (les seuls affleurements).

Les travaux de thèse de Coralie Aichholzer ont ainsi permis de montrer une sédimentation continue et homogène, à l'échelle du bassin, des formations du Secondaire malgré des variations latérales d'épaisseur et de faciès. Ils ont ainsi pu contribuer à faire avancer les problématiques industrielles en lien avec la géothermie profonde dans la région, en plus de la compréhension de son histoire géologique.

Par ailleurs, l'énorme synthèse lithostratigraphique des séries cénozoïques effectuée a permis de remettre à plat l'ensemble de la stratigraphie alsacienne liée à l'effondrement du fossé rhénan. (Düringer et al. 2019, Aichholzer et al. 2019).

En géothermie profonde, il est très important pour la rentabilité du projet de bien connaître la température du réservoir. Grâce aux récents travaux effectués sur la couverture sédimentaire, une nouvelle méthodologie d'estimation de la température dans le réservoir à partir du gradient de température en surface a été appliquée dans le fossé rhénan. ES Géothermie et les équipes de l'Université de Strasbourg ont ainsi étudié la méthode des forages de gradients qui consiste à faire une série de forages peu profonds (200 m) pour diverses zones d'intérêt afin d'y mesurer des profils de températures à l'équilibre, puis d'en dériver le gradient thermique profond dans l'optique d'identifier le secteur le plus adapté à l'établissement d'une centrale géothermique (Harlé et al., 2019).

Philippe Düringer

MODÉLISATION THERMO-HYDRO-MÉCANIQUE ET CHIMIQUE (THMC)

La récente histoire sur l'Eurométropole de Strasbourg montre un besoin accru de modèles numériques prédictifs comme outils d'intégration et de décision pour l'exploration et l'exploitation des réservoirs géothermiques profonds.

Grâce au LabEx, nous avons initié un groupe de travail sur la modélisation THMC (WG9). Une première phase des travaux a porté sur un modèle à grande échelle de la circulation naturelle des fluides profonds. Cette modélisation s'appuie sur la prise en compte des couplages entre les processus physiques mécaniques, thermiques et hydrauliques (THM) en intégrant les connaissances acquises sur les sites de Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen. Le modèle développé reproduit les profils de température observés en puits et met en évidence un système convectif à grande échelle sur plus de 3 km d'épaisseur. L'étude menée pendant la thèse de Bérénice Vallier a montré que la circulation hydrothermale pouvait se développer jusqu'à des faibles profondeurs, indépendamment de la transition socle-couverture qui est pourtant classiquement admise comme le toit hydraulique des réservoirs de géothermie profonde. Ces résultats suggèrent une plus faible influence de la lithologie sur la circulation hydrothermale dans le Fossé Rhénan. L'influence des failles géologiques a également été étudiée, en particulier la faille de Rittershoffen qui ne contribuerait que de façon mineure à la circulation générale profonde dans ce secteur. L'importance de la rhéologie du fluide, en particulier sa viscosité, a aussi été identifiée comme un paramètre clé de la circulation naturelle.

Dans une deuxième phase, le groupe s'est intéressé au développement d'un nouveau concept pour la surveillance des réservoirs. Il s'agit du développement, dans le cadre de la thèse de Jérôme Azzola, d'une nouvelle technique permettant un suivi à moindre coût de l'évolution des propriétés physiques des roches et de la déformation continue du réservoir, y compris les déplacements asismiques potentiellement associés aux phases de nucléation d'événements sismiques notables. L'approche est basée sur le développement d'un modèle numérique visant à prédire les mesures de déforma-

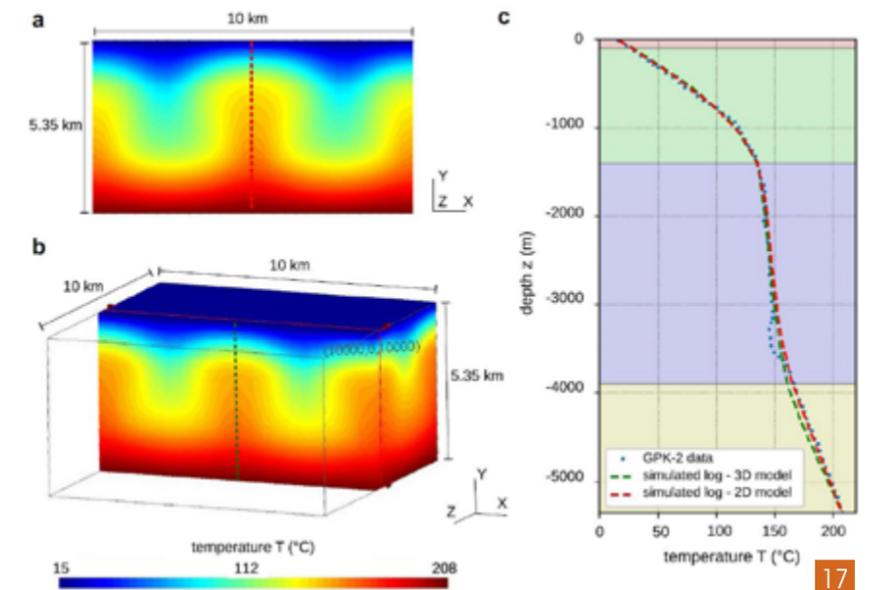


Figure > [17] Carte des températures prédites par le modèle en 2D et 3D et comparaison avec le profil de température mesurée à Soultz-sous-Forêts (GPK2). Crédits : Vallier et al., 2020

tion du milieu par interférométrie d'ondes sismiques lentes (i.e. coda) (CWI). Cette modélisation offre de nouvelles perspectives pour l'interprétation des mesures sismologiques faites au voisinage des réservoirs. Le projet a confirmé qu'à l'échelle du laboratoire, un échantillon sous contrainte montre des décalages temporels de la coda qui peuvent être associés à sa déformation élastique. En étendant la modélisation au réservoir, il devrait être ainsi possible d'imager l'effet d'une augmentation de la pression interstitielle dans une faille d'un réservoir géothermique profond.

Plus récemment, grâce à une collaboration avec le GFZ Potsdam, un nouvel axe a été initié pour quantifier l'impact des matériaux de remplissage sur les propriétés hydromécaniques des failles partiellement cicatrisées. En effet, le flux de fluide induit par la circulation forcée dans les réservoirs fracturés comme les systèmes géothermiques améliorés (EGS) est localisé dans les fractures et les failles qui sont les éléments clés de leur performance hydraulique et de leur durabilité. À l'échelle de la faille, l'efficacité de l'écoulement est influencée

par la localisation des zones ouvertes qui dépendent fortement de la rugosité de la faille, de son niveau de cicatrisation par les minéralisations secondaires, de l'amplitude du déplacement relatif lié aux séismes anciens et de l'importance des flux de fluide entre la matrice et la faille elle-même. Sur le plan mécanique, la rigidité et la résistance d'une faille peuvent être également dégradées ou renforcées par le matériau de cicatrisation qu'elle contient, ce qui peut avoir des conséquences importantes lors de la stimulation chimique ou hydraulique.

Nous avons commencé à mener des expériences numériques dans un massif de granite contenant une seule grande faille partiellement scellée, à l'échelle de 500 x 500 m². Une évaluation de l'effet de la chenalisation à travers la faille a été réalisée pour différents degrés de cicatrisation. Nous avons également mis en évidence un changement de son module de rigidité qui conditionne la réponse de la faille lors d'une stimulation hydraulique.

Jean Schmittbuhl



SCIENCES SOCIALES : GÉOTHERMIE PROFONDE, ACTEURS ET TERRITOIRES

Le groupe de travail en sciences sociales a été créé en 2015. Un des premiers objectifs a été d'observer les quatre enquêtes publiques organisées autour des projets plus ou moins controversés de la Robertsau, Mittelhausbergen, Illkirch-Graffenstaden et Eckbolsheim. Depuis, les travaux du groupe ont été inscrits dans les projets EGS Alsace et H2020 Destress, ce qui a permis d'élargir les perspectives de recherche. Dans ce cadre, une enquête sur les représentations publiques de la géothermie profonde en milieu urbain et en milieu rural a été menée en associant une approche quantitative (questionnaires) à une approche qualitative (entretiens et focus groups). En parallèle, une étude de la presse nationale et alsacienne a été initiée. Le corpus étudié intègre désormais près de 4000 articles couvrant la période 2002-2020. Enfin, un réseau de sismologie citoyenne regroupant une quarantaine de participants volontaires en Alsace a été constitué en collaboration avec le groupe de travail sismologie du LabEx. Ce réseau fait l'objet d'un suivi sociologique concernant la nature de l'engagement citoyen par rapport aux sciences et technologies. Ces travaux intègrent des analyses détaillées portant sur la gouvernance des projets, le rôle des médias, la dynamique des controverses, etc. En première conclusion, nous avons identifié des liens entre les modes de gouvernance et la perception publique des projets.

Ainsi, notre étude montre que les projets les plus contestés comportent un déficit de concertation en amont entre les opérateurs et les élus ou les riverains. Nous les avons qualifiés de projets hors-sols, dans le sens où ils ont été élaborés à la faveur d'avantages économiques et/ou de programmations politiques nationales, en ignorant des réalités du territoire local. Ces projets non concertés suscitent d'emblée une opposition forte car ils semblent menacer la liberté d'une municipalité ou d'un quartier qui défendent leur droit d'être acteurs du devenir de leur territoire. A l'inverse, les projets concertés en amont avec les élus locaux et les citoyens sont mieux perçus par la population. Un manque de transparence et d'information concernant les projets de géothermie a souvent été mis en avant par les riverains et une partie des élus. Or, les projets alsaciens ont bénéficié dès le départ d'une importante couverture médiatique. La presse joue ici le rôle de caisse de résonance pour la promotion des projets : les opérateurs et les décideurs politiques locaux apparaissent comme les référents majeurs pour les journalistes. Les discours privilégiés par la presse locale rencontrent rarement les attentes des riverains. La géothermie y est associée à la transition énergétique, aux plans climats, aux bénéfices collectifs, alors que les riverains recherchent des informations sur les sites d'implantation des centrales, la nature des risques induits par les activités

géothermiques. De fait, ils privilégient des sources d'informations alternatives pour construire leur propre opinion. Nous avons observé que les associations de riverains et plusieurs municipalités jouent un rôle de contre-expertise et diffusent largement leur analyse sur des blogs, des journaux municipaux et de quartiers sans oublier les réunions publiques et le bouche à oreille. En résumé, le manque de dialogue et d'écoute semble caractériser les développements de la géothermie profonde alsacienne. Pourtant, plusieurs espaces auraient pu être le lieu d'échanges construits entre industriels, associations et citoyens : les enquêtes publiques, les séminaires et les réunions organisés par le Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles (SPPPI), ou encore le comité consultatif institué par l'Eurométropole de Strasbourg. Pourquoi ces initiatives n'ont-elles pas porté leurs fruits ? C'est l'un des chantiers que nous aborderons dans le cadre de l'ITI GeoT. Une analyse du fonctionnement de tels dispositifs est cruciale, d'autant plus que le domaine de la géothermie profonde subit depuis 2019 une crise sans précédent suite aux séismes induits par l'une des centrales en développement.

Philippe Chavot, Yeny Serrano, Anne Masseran, Jean Zoungrana

Figure > [17] Extraits du corpus de 4000 articles de presse constitué pour l'analyse de la perception publique des projets de géothermie profonde

COMMUNICATION DES RÉSULTATS SCIENTIFIQUES

PUBLICATIONS ET CONGRÈS

Les travaux financés par le LabEx et les projets associés au sein de la Chaire industrielle en géothermie profonde ont été valorisés dans de nombreuses publications et lors de nombreux colloques, dont le nombre s'est accru à partir de 2015. En moyenne, les chercheurs ont publié plus de 20 publications chaque année, l'apogée étant en 2015 avec 25 publications, dans des revues telles que Geothermal Energy, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Geothermics, Geophysics, Solid Earth, Journal of Geophysical Research, Applied Geochemistry... Au total, 133 articles scientifiques ont été publiés dans le cadre du LabEx entre 2014 et 2020. Retrouvez toutes les publications sur le site web du LabEx (labex-geothermie.unistra.fr) Ils ont présenté leurs travaux lors de 10 à 20 colloques par an, représentant 40 à 50 communications (présentations orales et posters). Au total, cela représente près de 250 présentations et posters.



Photo > [18] Présentation lors de l'EGW 2018 organisée par le LabEx G-eau-thermie Profonde. Crédits : J.Schmittbuhl

CAFÉS LABEX

Chaque année, l'équipe du LabEx a organisé des Cafés LabEx (2 à 5 par an) permettant aux uns, notamment les doctorant.e.s et post-doctorant.e.s, de présenter leurs travaux, et aux autres de se tenir au courant des avancées scientifiques réalisées par les chercheurs impliqués dans les différentes thématiques. Et à tous d'apprendre à se connaître et d'échanger. Un outil de communication interne fort apprécié.



EGW : RENCONTRE EUROPÉENNE DEVENUE INTERNATIONALE

Depuis 2012, le LabEx et le KIT (Karlsruher Institut für Technologie) organisent conjointement et alternativement l'European Geothermal Workshop. Depuis 2018, l'EERA (l'European Energy Research Alliance, dont le LabEx, par l'Université de Strasbourg, est membre) fait partie du comité d'organisation, augmentant ainsi la visibilité de l'événement. Lors de cette rencontre européenne de deux jours, les scientifiques, doctorants et experts y présentent leurs travaux et échangent sur



les avancées en matière de géothermie profonde en Alsace, en Europe et dans le monde, concernant l'exploration, l'ingénierie, l'exploitation, la surveillance, la modélisation, les risques associés, etc. Au fil des ans, l'événement a accru sa

notoriété, dépassant les frontières de l'Europe. Ainsi, en 2018, il a rassemblé 140 participants, venant de plus de 17 pays à travers le monde. En 2020, en raison de la crise sanitaire, l'EGW s'est tenu en ligne, rassemblant 300 participants de 36 pays.

Les liens vers les recherches évoquées dans ce numéro spécial sont disponibles ici : <https://labex-geothermie.unistra.fr/les-publications/>

LE BCSF-RÉNASS : UN SERVICE CENTRAL POUR LE SUIVI DE LA SISMICITÉ INDUITE

Le BCSF-Rénass est un service national d'observation du CNRS-Insu qui a pour objectif de collecter, analyser et diffuser les informations sur la sismicité française. Le LabEx G-Eau-Thermie Profonde s'est fortement appuyé sur ce service et son expertise pour le suivi de la sismicité en lien avec les projets géothermiques en Alsace. Les sites web du BCSF-Rénass constituent un canal de diffusion de l'information de référence et qui est largement consulté par la population et les autorités.

Lors de la crise sismique qui a affectée la zone Nord de l'Eurométropole, et associée au projet de géothermie profonde Geoven, le BCSF-Rénass a détecté et localisé plus de 600 séismes entre le printemps 2018 et juillet 2021. Une vingtaine de ces séismes ont dépassé la magnitude MLv 2, et quatre la magnitude MLv 3. L'analyse de cette sismicité s'effectue à partir des enregistrements des stations sismologiques permanentes régionales de Résif-RLBP et Résif-RAP, des stations allemandes permanentes et temporaires et des stations à bas-coût (RaspberryShake) installées par l'Eost dans l'Eurométropole depuis 2017. Chaque événement détecté automatiquement est ensuite revu manuellement par un expert analyste afin de préciser la localisation et la magnitude et de le classer en fonction d'une grille de critères. Pour les principaux événements, des mécanismes au foyer sont également produits.

Le BCSF-Rénass collecte aussi les données macrosismiques permettant d'estimer l'importance de l'intensité de la secousse dans chaque commune notamment via les témoignages des citoyens. Il a par exemple collecté environ 1500 témoignages pour l'événement du 4-12-2020 (magnitude MLv 3.6) largement ressenti. La combinaison des données macrosismiques et instrumentales permet de calculer une carte de l'intensité de la secousse au sol ("shakemap") qui constitue une information importante pour la gestion de crise.

Marc Grunberg, Antoine Schlupp, Jérôme Vergne

renass.unistra.fr
www.franceseisme.fr

SUIVI GÉODÉSIQUE DE SITES GÉOTHERMIQUES

LA GÉODÉSIE SPATIALE QUANTIFIE LES DÉPLACEMENTS ET LA DÉFORMATION DE LA SURFACE DE LA TERRE. ELLE PERMET, VIA DES MODÈLES, D'Étudier LES PROCESSUS QUI GÉNÈRENT DES DÉFORMATIONS EN PROFONDEUR, RÉPERCUTÉES JUSQU'EN SURFACE.

Dans le cadre de la géothermie, elle est utilisée à long terme et à court terme. Sur le long terme, elle permet de suivre l'évolution du réservoir au cours du temps, par exemple de travailler sur les variations de température du réservoir ou les variations de volume d'eau. En général, les déplacements seront ténus et le traitement devra être optimisé pour obtenir les résultats les plus précis possibles. Sur le court terme, on cherche plutôt les phénomènes transitoires, quelquefois à risque, comme les déplacements de nature sismique liés à l'occurrence de séismes ou de glissements asismiques. Les déplacements de surface peuvent également révéler une anomalie des installations industrielles en fonctionnement, comme une fuite dans le tubage d'un puits ou des variations de volume du milieu environnant sous l'effet de l'hydratation (comme à la centrale géothermique de Landau; Heimlich et al., 2015). Les déplacements du sol peuvent ici être significatifs. Ainsi, à la difficulté de mesurer aussi bien de faibles et de forts déplacements, s'ajoute la difficulté de les quantifier de façon rapide pour intégrer ces approches aux systèmes de surveillance et d'alerte.

Deux types de données sont utilisés, les données de stations GNSS et les données d'imagerie satellitaire Radar (SAR). Les premières permettent de suivre les déplacements du sol en continu mais sur un nombre de sites réduit. Au contraire, les secondes sont combinées (Interférométrie

Radar, InSAR) pour obtenir un champ de déplacement sur le terrain d'étude avec une fréquence temporelle supérieure au mois il y a une dizaine d'années, à 6 jours aujourd'hui grâce à la constellation Sentinel-1 de l'ESA.

Dans le cadre du Labex, nous avons d'abord travaillé sur l'incident de Landau (Heimlich et al., 2015) et montré l'utilité de la géodésie spatiale InSAR pour la détection puis la quantification des déformations liées à un incident dans un puits. Ce premier travail a conduit à proposer l'utilisation à la fois de l'InSAR et du GNSS comme outil d'alerte. Cela a conduit à installer au moins une station GNSS sur l'ensemble des sites géothermiques. Et à développer des travaux pour améliorer la détection automatique des déplacements dans les cartes InSAR (Henrion, 2019).

L'installation des stations GNSS se révèle particulièrement intéressante dans la crise sismique de la centrale géothermique de

Vendenheim. En effet, l'étude de la série temporelle de cette station montre que les différents épisodes de sismicité sont accompagnés par des mouvements en surface anormaux ; le déplacement du site GNSS s'écarterait du mouvement séculaire de la plaque eurasiatique (figure 1). Il ne s'agit pas de mouvements cosmiques, liés aux plus gros événements ($M > 3.0$), qui resteraient de très faible amplitude (inférieur à 1 mm), mais de déplacements s'étalant sur plusieurs semaines, correspondant probablement à des glissements lents le long de failles en profondeur. Malheureusement, l'absence d'un réseau dense de stations GNSS ne permet pas de contraindre les déplacements en 3D et sur l'ensemble de la zone, mais leur mise en évidence, y compris dans les phases préliminaires de test sur le premier puits foré montre que le GNSS est un outil précieux pour préciser le comportement des failles sur les sites géothermiques dès l'initiation des projets.

Frédéric Masson

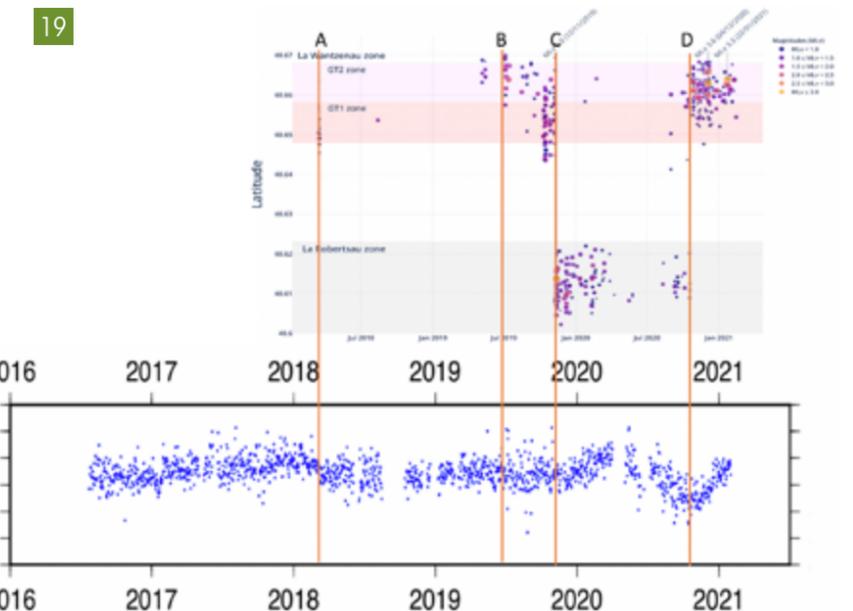


Figure > [19] haut : sismicité en fonction du temps et de la latitude autour du site géothermique de Vendenheim. Bas : série temporelle GNSS (composante nord) après avoir enlevé la tendance correspondant au mouvement séculaire de la plaque eurasiatique. Crédits : F. Masson

LE CENTRE DE DONNÉES DE GÉOTHERMIE PROFONDE (CDGP)

Le CDGP collecte, décrit, distribue et archive les données de géothermie profonde, en mettant en œuvre une infrastructure permettant de respecter la propriété intellectuelle des données tout en les ouvrant au maximum. Le CDGP suit les recommandations FAIR, la référence en matière de science ouverte et de gestion des données qui garantit des données faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables. Certaines données sont aussi disponibles sur la plateforme Aléa anthropique de l'infrastructure de recherche européenne Epos.

Le centre de données de géothermie profonde (CDGP) a été créé en 2016 pour préserver, documenter, archiver, donner accès et distribuer les données acquises sur les sites de géothermie en Alsace. Il collecte les données des différentes phases d'un projet, mais essentiellement celles de l'exploration et du développement, pas (encore) de l'exploitation, et potentiellement du suivi et de la remédiation en fin de projet. Les données sont des données sismologiques (catalogues, formes d'ondes, mécanismes au foyer), sismiques, hydrauliques, géologiques, et toutes celles relatives à l'aléa anthropique.

Elles sont vérifiées et validées (et cela est

souvent plus difficile pour les données patrimoniales), décrites (selon des standards ISO 191xx), et des règles de distribution définies par le propriétaire y sont associées. Un identifiant pérenne DOI est associé aux collections. Les données sont converties dans des formats standards et archivées dans des entrepôts de données. Lorsqu'un utilisateur demande un jeu de données, une infrastructure d'authentification, d'autorisation et de suivi intervient pour valider la demande : elle peut être acceptée - et les données sont mises à disposition dans un espace personnel-, refusée, ou mise en attente de validation du propriétaire des données. Cette infrastructure est importante (vitale) pour les données industrielles qui sont souvent réservées au secteur académique. Son bon fonctionnement est une condition nécessaire pour garder la confiance des fournisseurs de données et en assurer la propriété intellectuelle. Dès la conception du CDGP, les procédures ont été mises en place pour respecter les spécifications internationales de gestion et d'archivage des données (OAIS, plan de gestion des données); les principes FAIR sont respectés pour rendre les données Faciles à trouver, Accessibles, Interopérables, Réutilisables. Conformément aux recommandations de l'Union européenne, et pour se conformer au plan pour la science ou-

verte, les données sont aussi ouvertes que possible, aussi fermées que nécessaire. Le CDGP s'est inscrit dans une démarche de certification CoreTrustSeal. Le CDGP est également un nœud du consortium Aléa anthropique (TCS-AH) de l'infrastructure de recherche européenne Epos. La plateforme tcs.ah-epos. eu donne accès à des épisodes liés aux aléas anthropiques (ensemble de données géophysiques, technologiques et autres géo-données pertinentes, corrélées dans le temps, qui établit un lien entre la sismicité anthropique et sa cause industrielle ou humaine). Actuellement, cinq épisodes relatifs à Soultz-sous-Forêts y sont disponibles, et deux épisodes relatifs aux développements à Rittershoffen et Vendenheim vont être ajoutés. Des outils de visualisation et des applications de traitement permettent d'analyser les données. La plateforme permet à chaque utilisateur de disposer d'un espace de travail, de déposer ses données, et de les partager avec d'autres utilisateurs. La mise en place du CDGP, la mise à disposition des données et la connexion à la plateforme Epos-AH a bénéficié de nombreuses contributions humaines et financières. Que toutes et tous soient remerciés pour leur contribution, avec une mention particulière pour ES-Géothermie qui a largement contribué à la mise à disposition des données patrimoniales de Soultz-sous-Forêts.

Marc Schaming

CDGP : <https://cdgp.u-strasbg.fr>
Epos : <https://www.epos-eu.org/>

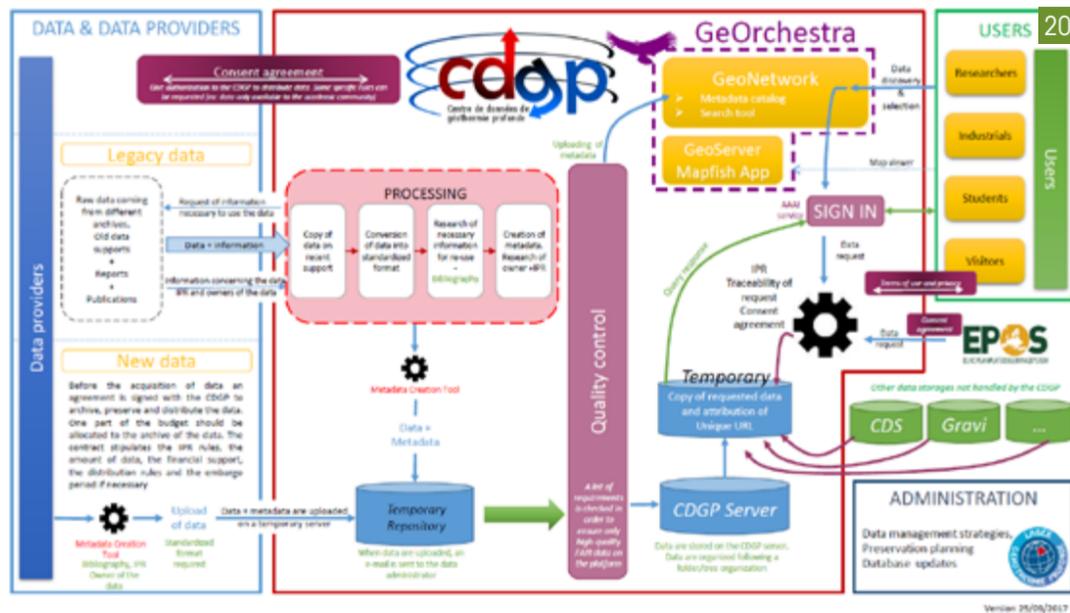


Figure > [20] Diagramme fonctionnel du CDGP - https://cdgp.u-strasbg.fr/fonctional_diagram.html. Crédits : CDGP

FORMATION DES FUTURS E.S CHERCHEUR, SE.S ET INGÉNIEUR, E.S

Du master au post-doctorat, le LabEx G-eau-thermie Profonde a participé à la formation des futurs ingénieurs et des futurs chercheurs : accueil et financement de stagiaires, financement et encadrement de thèses et de post-doctorats, mise en place du module de géothermie pour les élèves ingénieurs de l'Eost...

20 THÈSES FINANCÉES ET SOUTENUES OU EN COURS

De 2012 à 2020, 20 doctorants ont rejoint les équipes impliquées dans le LabEx pour y réaliser leurs travaux de thèse, cofinancée par le LabEx (ou projets associés). Par ordre d'apparition, ils sont :

- Maximilien Lehuteur, 2013-2015, Étude d'un réservoir géothermique profond par corrélation de bruit sismique ambiant (Sismologie – Financée par ES)
- Marion Pollet Villard, 2014-2016, Evolution de la surface réactive du feldspath potassique au cours de son altération en contexte géothermal (Hydrogéochimie – Financée par le LabEx)
- Xavier Kinnaert : Estimation des erreurs lors du traitement de la sismicité induite et de leur impact sur les modèles de réservoirs géothermiques (Sismologie – Cofinancée par le LabEx et le KIT)
- Christine Heimlich : Méthodes géodésiques appliquées à la géothermie et mesures de déformations locales dans le Fossé rhénan supérieur (Géodésie – Financée par le LabEx et la Région Alsace)
- Jeanne Vidal, 2014-2017, Ressources géothermiques à l'interface couverture sédimentaire socle dans le fossé Rhénan (Géologie – Cofinancée par le Labex et l'Ademe)
- Camille Jestin, 2015-2018, Modélisation analogique du glissement sur les failles (Sismologie – Financée par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche)
- Luke Griffiths, 2015-2018, Thermal microcracking in rock (Physique des roches – Financée par le Labex IA et l'IdEx de l'Université de Strasbourg)
- Coralie Aichholzer, 2016-2019, Modalités stratigraphiques, sédimentaires et structurales de la transition couverture-socle dans le fossé rhénan. Application à la géothermie (Géologie – Financée par le Labex et Université de Strasbourg)
- Eric Henrion, 2017-2019, Suivi géodésique des réservoirs souterrains (Géodésie – Financée par ES et Storengy)
- Bérénice Vallier, 2015-2018, La modélisation thermo-hydro-mécanique de l'exploitation d'un réservoir géothermique profond dans le fossé rhénan (Modélisation – Financée par l'Ademe dans le cadre du projet EGS Alsace)
- Nolwenn Portier, 2016-2019, Suivi temporel d'un réservoir géothermique par gravimétrie hybride et magnétotellurie : Application aux sites de Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen en Alsace (France) et aux sites de Krafla et Theistareykir en Islande (Magnéto-tellurie Gravimétrie – Financée par le Labex et la Région Grand-Est)
- Jérôme Azzola, 2016-2019, Suivi géophysique non-conventionnel des réservoirs géothermiques profonds (Sismologie – Financée par la Commission Européenne dans le cadre du projet H2020 Destress)
- Alexandra Renouard, 2017-2020, Etude sismologique du Nord-Est de la France : caractérisation des structures actives et contraintes sur l'aléa sismique (Sismologie – Financée par le Labex et le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche)
- Carole Glaas, 2017-2020, Perméabilité des réservoirs géothermiques profonds fracturés, altérations hydrothermales et logs électriques (Géologie – Financée par une bourse CIFRE, en partenariat avec ES Géothermie)
- Rike Köpke, 2017-2020, Localisation de la sismicité induite à Rittershoffen (Sismologie – Financée par le LabEx et le KIT)
- Dariush Javani, 2018-2021, Modélisation de la variation de vitesse de l'onde P liée au glissement de faille dans un réservoir fracturé (Modélisation – Financée par le Total)
- Qingling Deng, 2019-2022, Comportement hydromécanique multi-échelles d'une fracture rugueuse : implications pour la stimulation des réservoirs EGS (Modélisation – Financée par le China Scholarship Council)
- Kamel Drif, 2019-2022 Développement d'outils de monitoring des réservoirs géothermiques profonds EGS à partir du suivi haute résolution de la micro-sismicité induite et d'approches d'intelligence artificielle (Modélisation – Financée par l'Ineris)
- Weiwei Shu, 2020-2023, Modélisation analogique du glissement de frottement sur les failles : implications pour la sismicité induite et déclenchée (Sismologie – Financée par le China Scholarship Council)

Photo > [21] Nolwenn Portier, dont la thèse (voir page 11) a été cofinancée par le LabEx, effectue des mesures de gravimétrie sur le site géothermique de Theistareykir en Islande



TÉMOIGNAGES

« J'apprécie de travailler dans un projet qui associe les milieux académique et industriel. C'est une occasion de monter des projets ambitieux. Par exemple, j'ai pu participer au projet EstOf-250 qui visait à installer un grand nombre de capteurs sismologiques sur une zone couvrant près de 400 km2 au nord de l'Alsace. » Maximilien Lehuteur

« L'inscription de ma thèse dans le cadre du LabEx a été l'opportunité pour moi de rencontrer et d'échanger avec différents corps de métier et spécialités, tant académiques qu'industriels. » Christine Heimlich

« Ma thèse a été très enrichissante. Le LabEX regroupe différentes thématiques de recherche, des objectifs industriels ainsi que des problématiques techniques très intéressantes. L'association de ces domaines apporte un réel plus dans la formation d'un doctorant. L'organisation de réunions régulières et de groupes de travail au sein du LabEX nous permet d'échanger avec les scientifiques et industriels des différents projets et de suivre l'avancement des travaux en cours. On améliore ainsi nos connaissances dans les domaines scientifiques variés et sur les enjeux industriels. Cela nous apprend aussi beaucoup sur la gestion de projet et le travail en équipe » Marion Pollet Villard [...]

[...]

« La cotutelle est une expérience que je conseille, elle permet d'avoir très régulièrement les avis de personnes travaillant dans des unités de recherche différentes. J'ai eu la chance de présenter mon travail lors de congrès européens et surtout lors de séminaires informels à Strasbourg (Cafés LabEx) et Karlsruhe. » Xavier Kinnaert

« Ces méthodes de positionnement et le travail au contact des industriels m'ont toujours plu. C'est passionnant cette possibilité de suivre à distance avec des systèmes d'acquisition situés à 20 000 km au-dessus de nos têtes. Me former à ces techniques pendant trois ans est une chance, que j'aimerais appliquer dans le monde industriel par la suite. » Eric Henrion

13 POST-DOCTORATS

Le LabEx a également permis d'initier la carrière de doctorants en les recrutant sous forme de post-doctorat à partir de 2016. Ils sont :

- Lena Cauchie, 2016-2018, Analyse des séismes induits lors de la stimulation de réservoirs géothermiques (Ademe EGS Alsace)
- Alexandra Kushnir, 2016-2018, Mesures des propriétés physiques des roches du site de Soultz-Sous-Forêts aux conditions in situ (ANR Cantare)
- Jamie Farquharson, 2016-2018, Expériences en laboratoire de stimulation chimique d'un réservoir géothermique (H2020 Destress)
- Yassine Abdelfettah, 2016-2017, Mise en place d'une méthodologie couplée magnétotellurie-gravimétrie appliquée à l'étude des réservoirs géothermiques (cofinancement LabEx, ÉS, CoGéoS)
- Clio Bosia, 2017, Analyse minéralogique et isotopique d'échantillons de roches (Ringelbach et Strengbach) (LabEx G-eau-thermie Profonde)
- Maximilien Lehujeur, 2017, Projet de recherche EstOf (CoGeoS Prestations)
- Christine Heimlich, 2017, Etude sociologique de terrain et analyse des médias (H2020 Destress)
- Viet Van Ngo, 2017-2018, Simulation numérique avec le code de calcul Kirmat (H2020 Destress)
- Jessica Murray, 2017-2018, Etude des processus thermo-hydro-géochimiques de génération de l'hydrogène dans le contexte hydrothermal du fossé rhénan (Total)
- Cyrille Bodin, 2017-2019, Perception publique de la géothermie profonde en Alsace (H2020 Destress)
- Julien Ackerer, 2018, Caractérisation et modélisation des constantes de temps des transferts hydrogéochimiques dans les bassins versants vosgiens (ANR Cantare)
- Coralie Aichholzer, 2019-2020, La stratigraphie de la zone rhénane, en application à la géothermie profonde (LabEx G-eau-thermie Profonde)
- Arne Stormo 2013-2014, Origine mécanique des changements de la valeur b pendant la stimulation des réservoirs géothermiques profonds (LabEx G-eau-thermie Profonde)



LE MODULE GÉOTHERMIE À L'EOST

Le LabEx intervient également dans la formation des élèves ingénieurs et des étudiants en master 2 de l'Eost à travers le module Géothermie qui y est organisé chaque année. Il représente 25h de cours et fait intervenir huit personnes du LabEx, enseignants-chercheurs à l'Eost et professionnels d'ÉS Géothermie. Il donne l'occasion aux étudiants de visiter les centrales et site géothermiques de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen, ainsi que le Musée du Pétrole de Merkwiller-Pechelbronn. 30 à 50 étudiants en 3e année et en Master 2 y participent chaque année.

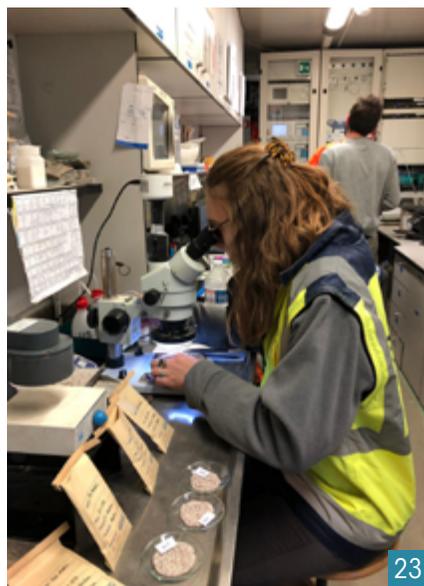
TÉMOIGNAGE

« Intéressée par la géothermie, j'ai suivi le module dédié à l'Eost lorsque j'étais en master Sciences de la Terre et des Planètes. J'ai pu visiter les centrales et rencontrer les professionnels d'ÉS. J'ai ensuite réalisé mon stage de fin d'études chez ÉS-géothermie : j'ai étudié les échantillons de roche des puits pour caractériser leur minéralogie et évaluer l'altération du granite. Il m'a beaucoup plu et j'ai voulu pousser les investigations plus loin et réaliser une thèse.

Avec Albert Genter d'ÉS et Jean-François Girard de l'Ite, mes encadrants, nous avons déposé un dossier de financement pour une thèse Cifre à l'Agence nationale de recherche et technologie (ANRT). Je suis employée par ÉS pour trois ans afin de réaliser

ma thèse qui se déroule à 70% dans l'entreprise.

La géothermie, en plus d'être une nouvelle source d'énergie très importante pour la transition énergétique, est aussi très stimulante sur les plans scientifique et industriel. » Carole Glaas



Photos >

[22] Visite de la centrale de Soultz-sous-Forêts dans le cadre du module Géothermie en 2019;

Crédits : J. Schmittbuhl

[23] Carole Glaas. Crédits : ES Géothermie