



HAL
open science

Comprendre les réservoirs fracturés pour mieux identifier la ressource géothermale

Chrystel Dezayes

► **To cite this version:**

Chrystel Dezayes. Comprendre les réservoirs fracturés pour mieux identifier la ressource géothermale. Sciences de la Terre. Cergy Paris CY Université, 2023. tel-04292602

HAL Id: tel-04292602

<https://brgm.hal.science/tel-04292602v1>

Submitted on 17 Nov 2023

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

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



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Manuscrit HDR

Pour obtenir le diplôme d'

HABILITATION à DIRIGER des RECHERCHES de l'UNIVERSITE CERGY-PONTOISE

Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Univers

Présenté par

Chrystel DEZAYES

Comprendre les réservoirs fracturés pour mieux identifier la ressource géothermale

HDR soutenue publiquement le **21 juillet 2023**,
devant le jury composé de :

Béatrice LEDESERT

Professeure à l'Université de Cergy Pontoise, Garante

Mme Françoise BERGERAT

Directrice de Recherche CNRS Emérite, Sorbonne Université,
Rapporteuse

Mr Thomas KOHL

Professeur, KIT, Rapporteur

Mr Andrea MOSCARIELLO

Professeur, Université de Genève, Rapporteur

Mme Sylvie Gentier

Directrice Scientifique de Programme, BRGM, Membre

Mme Judith SAUSSE

Professeure ENSG, Membre

Mr Jasmin RAYMOND

Professeur, INRS Québec, Membre

Mr Jean SCHMITTBUHL

Directeur de Recherche CNRS, Membre

Mr Albert GENTER

ESG, Invité



CERGY PARIS

UNIVERSITÉ

REMERCIEMENTS

En premier lieu, c'est Béatrice Ledésert que je voudrais remercier pour avoir accepté d'être ma garante dans l'obtention de cette HDR, mais aussi et surtout pour son soutien tout au long de ce processus et pour nos discussions de longue date depuis nos thèses à Soultz.

Depuis mon arrivée au BRGM, Sylvie Gentier a su être là tout au long de ma carrière, par des discussions scientifiques profondes, sensées, souvent en avance de phase, mais aussi pour pleins d'autres choses tout aussi enrichissantes. Je te remercie, d'une part, pour avoir accepté de suivre cette HDR au BRGM, et d'autre part, pour la relecture du manuscrit et les discussions animées et constructives qui en ont suivi dans le but de me faire sortir de ma coquille !

Il y a bien sûr le jury qui a accepté très volontiers d'évaluer ce manuscrit et de participer aux débats de sa soutenance. Tout d'abord, sa présidente, et amie très chère, Judith Sausse, qui attendait ce moment depuis fort longtemps (2009 déjà !). Quand aurons-nous l'occasion de présenter de nouveaux nos travaux ensemble à l'autre bout du monde ? Je serai là pour te rassurer dans l'avion, c'est promis.

Andrea Moscariello et Thomas Kohl qui ont jonglé avec leurs emplois du temps surchargés et leurs congés pour rédiger leur rapport. Pareil pour Françoise Bergerat qui mène une retraite tellement active qu'elle n'a pas pu être présente physiquement à la soutenance regrettant de ne pouvoir participer à « l'after ». Une bouteille de champagne est restée au frais pour toi et j'espère que nous aurons rapidement l'occasion de la boire et de discuter de toutes les questions en suspens sur le Fossé Rhéan.

Merci à Jasmin Raymond qui m'a ouvert chaleureusement la porte de son équipe et de nouveau horizon sur une géothermie encore moins facile. Jean Schmittbuhl, avec qui nous ne nous quittons plus depuis l'aventure du PEPR, merci pour tes discussions passionnantes qui vont évidemment se poursuivre ces prochaines années.

Enfin, Albert Genter qui me suit, supporte, soutient depuis mon DEA et sans qui je n'en serai pas là. Merci pour toutes ces années à tes côtés et celles un peu plus loin. Tu as su faire avancer la géothermie en Alsace et j'espère qu'elle continuera sur cette voie.

Depuis ton départ du BRGM, Bernard Sanjuan a pris le relai et, sans t'avoir remplacé, m'a permis de continuer à m'épanouir en géothermie. Je te remercie tout particulièrement, Bernard, pour toutes nos discussions, tes explications géochimiques, nos déjeuners à la cantine et nos missions agrémentées de choucroute et jarrets. Merci aussi de m'avoir fait découvrir ce bout d'Afrique qu'est Djibouti. Suis-je maintenant apte d'aller à Bouillante ?

Je tenais également à remercier tout particulièrement Catherine Lerouge, ma co-auteure préférée, sans qui tout cela n'aurait pas pu se faire. Merci pour nos incroyables missions de terrain tiraillées entre mesures de fractures et échantillonnages (pas trop, il n'y aura plus de place dans le coffre !), nos discussions interminables qui déviaient régulièrement de leurs objectifs mais qui nous ont fait bien avancé. J'espère que l'on pourra continuer, je n'ai plus de Cleebourg dans ma cave...

Je n'oublie évidemment pas tous mes collègues de l'équipe géothermie : Virginie, Camille, Julie, Fanny, Marilyne, Anne-Gaëlle, Mikael, Charles, les Antoinettes, Pascal, Théophile, Pierre, Arnold, Alexandre, Van Hieu, et au-delà Flox, Iza, Laure, Marie-Christine, Mathieu, Pierre, Adnand, Jean-Michel, François, Frédérick, Frédéric, Reno, Hugo ... ceux qui sont déjà partis à la retraite, Babeth, Lili, Bruno, ... et tous les autres. Merci également à Hervé Traineau qui, comme Albert, m'a connue toute petite et m'a lancé dans le grand bain de la géothermie !

Merci à tous mes collègues canadiens de l'INRS et de la CGC : Michel, Donna, Félix-Antoine, Mafalda, Mirah, Stephanie, Karine, Christine, Gilles et tous les autres avec qui j'ai passé des moments merveilleux dans le grand froid du Québec.

Je voudrais également remercier mon amie Gabrielle qui a eu la lourde tâche, en tant que fonctionnaire de l'Education Nationale, de nettoyer ce manuscrit des fautes d'orthographe (il y en reste sûrement encore...).

Et enfin, je ne finirai pas sans une pensée pour ma famille et plus particulièrement Olivier, Ioana et Youri qui sont à mes côtés (quasi) quotidiennement et qui constitue ma plus précieuse bulle.

A la mémoire de Laurent Le Bel,
initiateur de cette démarche.

Résumé

Ce travail d'HDR analyse l'apport de l'étude des réseaux de failles et de fractures à la compréhension des réservoirs géothermaux.

Après la présentation exhaustive de mes travaux de recherche, l'apport de mes études de la fracturation pour mieux comprendre les réservoirs EGS sont exposés dans la deuxième partie.

Cela passe dans un premier temps par une meilleure caractérisation du réseau de fractures afin de comprendre sa mise en place et son rôle. Dans le socle cristallin du Fossé Rhéna, les fractures ont été étudiées à partir des forages du démonstrateur européen EGS de Soultz-sous-Forêts et sur les analogues présents sur les épaules du graben. Ces travaux montrent que les fractures, bien qu'elles aient enregistré la tectonique tertiaire d'ouverture du graben, possèdent un fort héritage hercynien du fait de leur direction et leur organisation interne. Ce réseau de fractures est alors constitué de deux types de structures : des zones de failles qui structurent le réseau et des mésofractures qui affectent le massif de manière dense. Ces deux types de discontinuité s'organisent en cluster, montrant une densité hétérogène.

Dans un deuxième temps, la représentation en 3 dimensions de ces réseaux de fractures à l'échelle du puits permet de corréliser les fractures observées au puits et confronter leur position avec d'autres données dans l'objectif d'affiner le modèle conceptuel du réservoir. A l'échelle régionale, la modélisation du réseau de failles permet d'avoir une vision globale du sous-sol et de permettre le calcul volumique de la chaleur en place d'une formation.

Dans un troisième temps, l'étude des circulations des fluides dans le réservoir fracturé de Soultz et dans le système du Fossé Rhéna est développée. Les fractures sont le siège des circulations profondes du fluide géothermal sans qu'il soit vraiment possible de distinguer lesquelles sont les principales productrices de fluide au niveau du puits. Cependant, il apparaît que malgré la présence forte de fractures sub-méridiennes en lien avec l'ouverture du Fossé Rhéna, les fractures mises en place antérieurement lors de la tectonique hercynienne jouent un rôle majeur dans l'écoulement.

La dernière partie est consacrée aux perspectives de la mise en évidence de l'importance du rôle des failles et fractures dans la compréhension des réservoirs géothermaux profonds et, au-delà, pour leur exploration, quel que soit le contexte des systèmes géothermaux. Il est donc essentiel de développer une recherche intégrant l'étude de la fracturation lors de l'exploration de ces réservoirs comportant une approche intégrée et la plus quantitative possible en lien avec les nouvelles méthodes d'exploitation de la géothermie profonde, mais également les ressources minérales associées.

Sommaire

Avant-propos	7
Notice de titres et travaux	9
1. CURRICULUM VITAE	9
1.1. Formation	9
1.2. Expériences professionnelles	9
1.3. Expérience d'enseignement	10
2. ENCADREMENT SCIENTIFIQUE (DOCTORANTS, MASTERS, INGENIEURS FIN D'ETUDE)	11
3. JURY DE THESES ET MASTERS, COMITES DE THESES	13
4. PRINCIPAUX PROJETS SCIENTIFIQUES.....	14
5. PUBLICATIONS	16
5.1. Publications internationales à comité de lecture	16
5.2. Principales publications de congrès	21
5.3. Relecture d'articles à comité de lecture.....	25
6. ANIMATION DE LA RECHERCHE.....	26
Avancées scientifiques.....	27
1. CARACTERISATION DES MILIEUX GEOTHERMAUX PROFONDS FRACTURES EN DOMAINE DE SOCLE CRISTALLIN	29
1.1. Organisation de la fracturation	29
1.2. Mise en place de la fracturation.....	37
2. REPRESENTATION DES RESERVOIRS GEOTHERMAUX PROFONDS FRACTURES A DIFFERENTES ECHELLES.....	44
2.1. Représentation du réseau de fractures à l'échelle du réservoir	44
2.2. Représentation du réseau de fractures à l'échelle locale et régionale	47
3. CIRCULATION DES FLUIDES DANS LES MILIEUX GEOTHERMAUX PROFONDS FRACTURES	51
3.1. Circulations à l'échelle réservoir	52
3.2. Circulations à l'échelle régionale	58
Perspectives	61
1. COMMENT INTEGRER LA CONNAISSANCE DES RESEAUX DE FRACTURES ET DE FAILLES DANS L'EXPLORATION ?	61

2.	COMMENT L'ANALYSE STRUCTURALE PEUT CONTRIBUER A L'ESTIMATION DE LA PERMEABILITE ?	63
2.1.	Les structures à grande échelle	63
2.2.	Les structures à l'échelle locale.....	64
3.	COMMENT DETERMINER DE FAÇON SYSTEMATIQUE LA RESSOURCE A EXPLOITER ?.....	65
3.1.	Les différentes modélisations des systèmes géothermaux.....	65
3.2.	Analyse multi-critère des données	67
3.3.	Vers l'assimilation de données	68
4.	COMMENT ADAPTER L'EXPLORATION AUX NOUVEAUX CONCEPTS D'EXPLOITATION?	69
5.	COMMENT PRENDRE EN COMPTE L'EXPLOITATION DES PRODUITS DERIVES DANS LA DEMARCHE D'EXPLORATION ?.....	72
	Conclusions.....	73
1.	DE LA COMPREHENSION DES RESERVOIRS FRACTURES.....	73
2.	... A L'IDENTIFICATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMALE.....	74
	Bibliographie	75

Liste des figures

- Figure 1 – Classification des réservoirs fracturés en fonction de la porosité du réservoir par rapport à sa perméabilité (pourcentage dû à la matrice par rapport au pourcentage contrôlé par les fractures) (d'après Nelson, 2001). En gris, les systèmes géothermaux d'après le classement de Moeck (2014). 28
- Figure 2 – Localisation du site de Soultz-sous-Forêts dans le Fossé Rhénan et tracé des puits en carte et en coupe. (1) sédiments cénozoïques (2) volcanisme cénozoïque (3) Jurassique (4) Trias (5) socle hercynien (6) failles bordières du fossé (7) failles (8) distribution des températures à 1500m en °C (Haenel et al., 1979). (9) anomalies thermiques locales (Haenel et al., 1979). 30
- Figure 3 – Schéma conceptuel du réservoir fracturé de Soultz 33
- Figure 4 - Orientation des fractures dans le granite à partir de l'analyse des carottes et des images de paroi des puits de Soultz. Pour les puits GPK3 et GPK4, les données sont regroupées par faciès pétrographique majeur (Hooijkaas et al., 2006). La profondeur le long des puits indique la limite supérieure et inférieure des sections pétrographiques (altitude à partir du niveau marin de l'IGN). Diagramme de densité en projection de Schmidt, hémisphère inférieur, courbes à 10 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 % de la fréquence maximale. Géologie : (1) couverture sédimentaire, (2) granite standard, (3) granite standard avec une altération filonienne intensive, (4) granite riche en amphibole et en biotite évoluant progressivement vers un granite standard. (5) granite à deux micas et granite riche en biotite (Dezayes et al., 2010). 38

Figure 5 – Synthèse des principales orientations de fractures et des minéralisations associées dans le socle granitique et les grès permotriassique à l'intérieur du Fossé Rhénan (forages) et sur ses épaules (affleurements) (Dezayes et al., 2019b).	42
Figure 6 – Modèle de l'ensemble des zones de failles recoupant les puits de Soultz (Sausse et al., 2010).	44
Figure 7 – Deux hypothèses de corrélation de failles influençant l'épaisseur des grès du Buntsandstein dans la région d'Obernai et par là même, la valeur de la chaleur en place (Dezayes et al., 2008b).	48
Figure 8 – Exemples de fractures ouvertes et fermées sur carottes et images de paroi BTHV (BorheHole Televiewer). Ces images traduisent deux paramètres : l'amplitude de l'onde sonore réfléchi contre la paroi et le temps de transit ou temps d'aller-retour de cette onde. Dans le cas des fractures fermées, l'image en temps de transit ne montre pas de différence entre la fracture et le reste de la paroi, ce qui indique qu'il n'y a pas d'ouverture de la fracture.	51
Figure 9 – Modèle conceptuel d'une zone de failles (à gauche ; Genter et al., 2000) et diagrammes aux niveaux de deux zones de failles drainantes (à droite).	52
Figure 10 – Exemple de fractures au niveau desquelles il y a été observé des arrivées de fluide dans le forage GPK3 de Soultz.	53
Figure 11 – Orientation des fractures drainantes et de toutes les fractures observées sur les images de paroi des puits de Soultz.	53
Figure 12 – Modèle conceptuel de l'évolution des circulations des fluides à l'interface socle-couverture dans la carrière de Saint Pierre Bois (Dezayes et al., 2021).	56
Figure 13 - Schéma de circulation des fluides dans le Fossé Rhénan et de l'interaction des roches pendant les épisodes tectoniques du Tertiaire. (a) Rifting précoce pendant l'Éocène sous compression N-S associé aux paléofluides 1 et 2. (b) Rifting de l'Éocène inférieur et de l'Oligocène sous extension E-O associé aux paléofluides 3 et 4. (c) Situation actuelle. L'emplacement des sites géothermaux est indiqué sous forme de projection approximative. Les coupes transversales conceptuelles ont été modifiées d'après Sittler (1992). L'échelle verticale est exagérée. Flèches bleues : eaux météoritiques ; flèches rouges : saumures chaudes ; flèches courbes : cellule de convection. (Dezayes et al., 2019b).	59
Figure 14 – Coût et risque associés aux différents stades de développement d'un projet de géothermie (Gehring et al., 2012). Le dégradé de couleur reflète le niveau de risque depuis le rouge, représentant un risque important, jusqu'au vert et blanc, représentant un risque quasi nul. La phase de forage d'exploration (Test Drilling), en rouge foncé, constitue la principale barrière d'un projet de géothermie, le coût financier d'un forage pour confirmer l'existence d'une ressource géothermale viable étant très élevé.	62
Figure 15 – Exemple de modèle conceptuel en coupe du système géothermal de l'île de Petite Terre à Mayotte (Dezayes et al., 2023).	66
Figure 16 – Workflow général d'exploration intégrant des modèles physiques thermique, hydraulique et mécanique (Dezayes et al., 2019a).	66
Figure 17 - Données prises en compte et diagramme de génération des cartes de favorabilités à La Réunion (Dezayes et al., 2022a).	67
Figure 18 - Résultats de l'analyse SIG (à gauche) et de la simulation hydrothermique (à droite ; températures simulées à 500 m de profondeur) sur l'île de Petite Terre à Mayotte (Stages respectifs d'Ernesto Serrano et de Thomas Farlotti dans Dezayes et al., 2023).	68
Figure 19 – Les nouveaux concepts d'exploitation de la géothermie profonde. Explications dans le texte.	71

Avant-propos

Pourquoi passer une Habilitation à Diriger les Recherches lorsqu'on est au BRGM ? La question peut se poser dans une carrière de chercheuse non rattachée au système universitaire où l'HDR n'est pas requise pour évoluer. Cependant, elle concrétise un cycle et participe à la visibilité de la recherche pour les chercheur.e.s comme pour l'établissement.

C'est principalement dans l'optique de faire un bilan de mes travaux de recherches après 20 ans au BRGM (déjà...), mais surtout pour mener une réflexion sur la suite (car ce n'est pas encore fini...) que j'ai décidé de me lancer dans cette aventure scientifique.

Bien évidemment, l'objectif est aussi la reconnaissance de l'atteinte d'un haut niveau scientifique et la capacité à impulser des travaux de recherche, toujours plus pluridisciplinaires, autour des grands défis du sous-sol et de son utilisation pour l'énergie dans mon cas.

L'aboutissement d'importants projets de recherche, que sont le projet européen FP7 IMAGE et le projet ANR CANTARE-Alsace, m'ont clairement incitée à faire un point sur les résultats scientifiques intéressants qu'ils ont apportés en matière de compréhension des réservoirs géothermiques profonds et fracturés.

Ensuite, l'évolution du développement de la géothermie profonde amène à se poser des questions pour relancer la dynamique de recherche autour de l'utilisation du sous-sol pour l'énergie. Les récents problèmes liés au déclenchement de séismes ont donné un coup d'arrêt au développement industriel de la géothermie profonde. Il est donc temps de se demander comment apporter plus de certitudes lors de l'exploration amont, quelles pourraient être les alternatives en terme d'exploitation de cette ressource, comment mieux l'intégrer dans le système énergétique et aussi dans l'exploitation de ressources minières associées.

Mon souhait est donc de développer l'animation et la réflexion prospective de la recherche autour de ces questions pour permettre le développement serein de la géothermie et plus généralement de l'utilisation durable et raisonnée du sous-sol.

Etre chercheur au BRGM implique de participer à de nombreux projets, de contenus et d'applications divers et variés (recherche, appui aux politiques publiques, commerciales), mais également pluridisciplinaires lorsqu'on travaille en géothermie. Pour la rédaction de ce mémoire, il a donc fallu, dans un premier temps, trouver un fil directeur cohérent à mes activités de recherche parmi la multitude de projets dans lesquels je me suis impliquée.

Il a été cependant rapidement clair que la question scientifique centrale était de comprendre le fonctionnement des systèmes géothermiques profonds fracturés. La rédaction de ce mémoire s'est donc faite autour de cette question et s'articule autour de mes principales publications qui sont en lien avec les questions sous-jacentes (articles complets disponibles via les liens dans le texte). Ces questions ont été regroupées en 3 chapitres.

Le premier explique comment caractériser les milieux géothermiques profonds fracturés en domaine de socle cristallin et répond aux questions suivantes :

- Quelle est la part des failles et des fractures dans l'organisation des discontinuités du milieu ?
- Les échelles de fracturation jouent-elles un rôle dans la structuration du réseau de fractures ?
- Comment identifier les états de contraintes passés et actuels à travers la fracturation ?
- Quel est le lien entre les phases de fracturation et les remplissages minéralogiques des fractures ?

Le deuxième chapitre est consacré à la manière de représenter les milieux fracturés à différentes échelles et les questions suivantes se posent :

- Comment représenter un réseau de fractures observés en 1D (Forage, échantillonnage linéaire) dans l'espace en 3D ?
- Comment interpoler les failles observées en 2D (profils sismiques) dans l'espace en 3D ?

Enfin le troisième chapitre traite de la circulation des fluides dans les milieux géothermiques profonds et fracturés et tente de répondre aux questions suivantes :

- Quelles fractures produisent le fluide géothermal au niveau des puits de Soultz-sous-Forêts, site pilote de la géothermie EGS pour la production d'électricité ?
- Comment discriminer les fractures ouvertes, et potentiellement productrices, des fractures fermées ?
- Quel est le chemin des fluides profonds au travers du socle fracturé du Fossé Rhéan ?

La seconde partie de ce mémoire présente les questions soulevées par mes travaux antérieurs et les perspectives que la compréhension de la fracturation peut apporter à l'exploration systématique des systèmes géothermaux profonds pour diminuer les incertitudes de l'exploitation. Il conviendra alors de se poser la question de la définition de l'exploration pour ensuite axer notre réflexion sur les questions suivantes :

- Comment intégrer la connaissance des réseaux de fractures et de failles dans l'exploration géothermique ?
- Comment l'analyse structurale peut contribuer à l'estimation de la perméabilité ?
- Comment déterminer de façon plus systématique la ressource à exploiter ?
- Comment adapter l'exploration aux nouveaux concepts d'exploitation qui commencent à voir le jour ?
- Comment prendre en compte l'exploitation des produits dérivés de la géothermie dans la démarche d'exploration ?

Notice de titres et travaux

1. CURRICULUM VITAE

Après un parcours en physique appliquée, j'ai intégré l'ENS Lyon en Sciences de la Terre et j'ai suivi cette voie pour m'intéresser rapidement à des thématiques appliquées, dont la géothermie qui a été le sujet de mon DEA et de ma thèse réalisée sur le réservoir géothermique fracturé de Soultz-sous-Forêts (Alsace) situé à 5km de profondeur et constituant le premier démonstrateur dans le monde de la géothermie HDR. Après un passage au Canada, en post-doctorat, puis par des contrats privés sur les aspects de caractérisation de milieux fracturés, pour la mine, le génie civil ou la sismicité déclenchée, j'ai rejoint le BRGM dans le cadre, de nouveau, du projet européen de Soultz-sous-Forêts pour suivre la réalisation des forages profonds. Ma carrière s'est poursuivie sur les réservoirs fracturés profonds comme base des modélisations de circulations hydrauliques pour les aspects d'exploitation de la géothermie profonde dans les premiers temps, puis d'exploration dans différents contextes (socles et interface socle-couverture de bassins profonds, îles volcaniques). Depuis 20 ans au BRGM, j'ai évolué au fil des projets et, depuis une dizaine d'année, j'assume, en complément de mon travail de recherche, la fonction de correspondante scientifique pour aider et soutenir les équipes aux montages des projets dédiés à la géothermie et au stockage d'énergie.

1.1. Formation

Doctorat des Sciences de la Terre , Université de Chambéry Caractérisation et interprétation d'un volume rocheux fracturé à partir de données de forages. Les forages géothermiques de Soultz-sous-Forêts et autres exemples d'échantillonnages unidirectionnels. Mention Très Honorable avec Félicitations du Jury	1992-1995
DEA Géodynamique des Marges Océaniques et des Chaînes de Montagnes , Université de Chambéry Etude de la fracturation dans les forages de Soultz-sous-Forêts (Alsace, France). Mention Bien	1991-1992
Magistère des Sciences de la Terre , Ecole Normale Supérieure de Lyon. Mention Bien	1989-1991
DEUG A , Université J. Fourier (Grenoble I)	1988-1989
IUT Mesures Physiques , Université J. Fourier (Grenoble I)	1986-1988
Baccalauréat D , Lycée Léonard de Vinci, Villefontaine (38)	1986

1.2. Expériences professionnelles

Ingénieure-Chercheure au BRGM	Depuis 2002
Direction des Géoressources, Unité Géothermies et Stockage d'Énergie Cheffe de projet et experte géologue principalement dans des projets de recherche multidisciplinaires (ANR, Europe), mais également de service public (Mayotte). Correspondante scientifique Appui aux Politiques Publiques Correspondante scientifique Recherche Publique	Depuis 2020
Direction des Géoressources, Unité Ressources Géothermales	2012-2020

Cheffe de projet et experte géologue principalement dans des projets de recherche multidisciplinaires (ANR, Europe, ADEME), mais également de service public (La Réunion, Mayotte) et plus rarement de projets commerciaux à l'international.	
• Correspondante scientifique Relations Entreprises	2015-2020
• Correspondante scientifique Recherche Publique	Depuis 2015
Département de Géothermie, Unité Réservoirs Géothermiques	2007-2012
Cheffe de projet et experte géologue dans des projets de recherche multidisciplinaires (Europe, ADEME, TOTAL), mais également pour des projets commerciaux à l'international (Monaco, Rwanda pour montage).	
• Correspondante recherche pour la géothermie	2011-2015
Service Connaissance et Diffusion de l'information Géologique, Unité Géo-Energie	2002-2006
Géologue impliquée dans des projets de recherche (Europe, ADEME,...), principalement sur le programme de Soultz et le stockage de CO ₂ .	
Chercheure, Université de Savoie / CEA, Chambéry	2001-2002
Analyse de la fracturation dans la galerie CEA de Roselend et recherche des phases successives de déformation cassante pour la modélisation hydraulique en milieu fracturé.	
Ingénieure géologue, AMSATEC, Lyon, France	1999-2001
Etudes préliminaires de la future liaison TGV transalpine Lyon-Turin. Analyse structurale des puits sur carottes et imageries de paroi pour la reconnaissance de la stabilité des formations traversées.	
Post-doctorat, Université Laval, Québec, Canada	1996-1998
Caractérisation et modélisation d'un réseau de fractures au sein d'une mine pour la compréhension de la mise en place des gîtes miniers de Val d'Or.	

1.3. Expérience d'enseignement

Master1 GAIA à l'Université de Savoie	2012-2021
Diagraphies : cours, TD, examens	
Formations « Comprendre la Géothermie » et « La production d'électricité par géothermie »	
Maison de la Géologie	2013
BRGM	2010-2011
Ecole des Ponts Paris Tech	2011
OSUC ISTE	2011
Géostock	2010
Journée thématique Géothermie	2010
INRP (Institut National de Recherche Pédagogique) de Lyon	2006
ATER Université de Savoie	1995-1996
Enseignement de la géologie du DEUG à la Licence, soutien aux étudiants malentendants	
Monitorat Université de Savoie	1992-1995
Enseignement TP-TD de DEUG : cartographie, pétrographie	

2. ENCADREMENT SCIENTIFIQUE (DOCTORANTS, MASTERS, INGENIEURS FIN D'ETUDE)

Depuis mon arrivée au BRGM, j'ai régulièrement encadré et formé des stagiaires principalement de Maîtrise (18), mais également de Licences (2) et co-encadré 5 doctorants en lien avec des universités françaises (Strasbourg, La Réunion) et étrangères (Neuchâtel, Québec, Darmstadt).

Ernesto Macedo Serrano – Gis-based analysis for exploring geothermal favorability in the Petite Terre island, Mayotte- University of Mexico (Rosa Mario Prol Ledesma.	2022	Equivalent doctorat
Thomas Ferlotti - Intégration des connaissances géologiques, géochimiques et géophysiques dans un géomodèle 3D et simulation hydrogéologique afin de caractériser la ressource géothermale de l'île de Petite Terre à Mayotte. Fin d'étude ENSG.	2022	M2
Elisa Toussaint – Caractérisation du réservoir géothermique carbonaté du Dinantien dans les Hauts-de-France. Fin d'étude ENSG.	2021	M2
Madeline Chapelet (INRS Québec/Univ Rennes 1) – Evaluation du potentiel des anomalies géothermiques du bassin sédimentaire des Basses-Terres du Saint Laurent, Québec, Canada. Maîtrise ès Sciences (M.Sc.) en Sciences de la Terre (INRS) et en Sciences de l'Eau (Université de Rennes 1), cheminement bidiplômant parcours géoingénierie et environnement (J. Raymond).	2020-2022	M2
Matthis Frey (I. Saas, J. van de Vaart, TUDa) : co-encadrement, Assessing the Geothermal Potential in the Upper Rhine Graben by Integrating Geological and Geophysical Data.	2020-2023	Doctorat
Madeline Chapelet – Etude de la fracturation par photogrammétrie en bordure du Bassin Rhodanien. M2 Université de Rennes 1.	2019	M2
Amélie Dufour - Analyse de données géologiques et géophysiques pour l'estimation du potentiel géothermique dans la région d'Annecy. M2 Université de Rennes 1. Co-encadrement avec l'Université de Savoie (Jean-Luc Got)	2019	M2
Samantha Neeb- Interprétation 3D de données géophysiques sur un analogue superficiel de la zone de transition socle/sédiment dans le cadre de la géothermie haute température. 3 ^{ème} année EOST.	2018	M2
Miora Mirah Rajaobelison (J. Raymond, M. Malo, INRS Québec) : Participation au comité de thèse. Evaluation du potentiel géothermique de Madagascar.	2017-2021	Doctorat
Mafalda Miranda (J. Raymond, INRS Québec), co-encadrement d'une thèse sur le potentiel géothermique profond du Nunavik (Nord Québec) et étude de la fracturation pour l'estimation des circulations de fluides.	2017-2021	Doctorat
Bhavani Benard (Université de La Réunion) : Participation au comité de thèse. Le système hydrothermal du Piton des Neiges. Géochimies et isotopes stables des sources thermominérales..	2017-2020	Doctorat
Sarah Oreveillon – Orientation des fractures visibles sur les diagraphies des forages du Strenbach. 1 ^{ère} année de Maitrise GAIA, Université Savoie-Mont Blanc.	2016	M1
Gaëlle Gatellier – Complément de la base de données hydrogéothermiques du bassin molassique savoyard dans le cadre du projet GEOMOL. 3 ^{ème} année	2014	L3

de Licence Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement. Université d'Orléans.		
Inès Assoumou – Réalisation d'une base de donnée hydro-géothermique dans le bassin molassique savoyard. 3 ^e année cycle ingénieur Sciences de la Terre, Université Pierre et Marie Curie, Paris.	2013	M2
Emeline Caron – Réalisation d'une base de données porosité-perméabilité dans le Fossé Rhéna. Licence 3 Terre et Environnement. Université de Lille.	2012	L3
Angélique Gaudin – Relation tectonique et paléocirculations dans les granites de la bordure ouest du Fossé Rhéna. Master 2 Sciences de la Terre, Université Rennes 1.	2012	M2
Paul Baillieux (E. Schill, Université de Neuchâtel) : co-encadrement d'une thèse sur l'étude du système de fractures associé à une structure de horst dans la région de Soultz-sous-Forêts à partir de modélisation géologique 3D et d'inversion numérique	2009-2014	Doctorat
Gloria Heilbronn – Synthèse pétrographique du granite et modélisation géologique 3D du site géothermique de Soultz-sous-Forêts (Alsace, France). Master 1 Sciences et Gestion de la Terre. Université de Nice Sophia Antipolis.	2009	M1
Sébastien Haffen (Y. Géraud, Université de Strasbourg) : co-encadrement d'une thèse financée par l'ADEME et le BRGM sur les caractéristiques géothermiques du Buntsandstein d'Alsace à partir de mesures pétrophysiques et d'études structurales.	2008-2012	Doctorat
Typhaine Duval – Etude de profils sismiques en Alsace, interprétation. 2 ^e Année d'EOST. Université de Strasbourg.	2008	M1
Julien Castera – Synthèse des données géologiques et modèle 3D dans le cadre des forages géothermiques profonds de Soultz-sous-Forêts. Master 2 Gestion et Exploration Environnementale des Géoressources. Institut EGID, Université Bordeaux 3.	2008	M2
Cécile Massiot – Variations pétrophysiques dans des grès peu perméables du Buntsandstein. 1 ^{ère} année ENSG, Nancy.	2007	L3
François Sapin – Etude des sites HFR du Fossé Rhéna : Comparaison structurale entre les sites de Soultz-sous-Forêts (Alsace, France) et de Bâle (Suisse), établissement d'un premier modèle conceptuel du site de Bâle. 2 ^e Année ENSG, Nancy.	2005	M1
Guillaume Syren – Analyse de la fracturation utile à l'écoulement dans le forage profond GPK3 de Soultz-sous-Forêts. Master 2 Géologie Appliquée à l'Ingénierie de l'Aménagement. Université de Savoie.	2004	M2
Gina Hooijkaas – Petrography and fracture alteration of GPK3 borehole and revised geological model of Soultz-sous-Forêts Hot Fractured Rock site. Master 2 Free University of Amsterdam with Shell.	2004	M2
Emilien Maqua – Analyse de la fracturation à partir d'images de paroi dans le forage géothermique GPK3 de Soultz-sous-Forêts (Alsace, France). Maitrise des Sciences de l'Environnement, Université de Savoie.	2003	M2

3. JURY DE THESES ET MASTERS, COMITES DE THESES

Régulièrement, je suis conviée à évaluer le travail d'étudiant.e.s en master et doctorat dans des universités françaises et étrangères pour mes compétences sur les réservoirs profonds fracturés et la géothermie.

Evaluation des travaux de Maîtrise Maria José Valencia Oviedo (INRS Québec) : Geothermal potential fractured basement rock: the Charlevoix meteorite impact crater (Canada)	26 juillet 2022
Thèse Mafalda Miranda (INRS Québec) : Assesment of the deep geothermal energy source potential in remote northern regions : a study undertaken in the subarctic off-grid community of Kuujuaq (Nunavik, Canada)	14 juin 2021
Thèse Bérénice Vallier (IPGS) : Comité de thèse. Modélisation thermo-hydro-mécanique de l'exploitation d'un réservoir géothermique profond dans le Fossé Rhénan.	26 août 2019
Thèse A. Chabani (Ecole des Mines de Paris) : Comité de thèse. Analyse méthodologique et caractérisation multi-échelle des systèmes de fractures à l'interface socle/couverture sédimentaire. Application à la géothermie (Bassin de Valence, SE France).	19 juillet 2019
Pré-doc Maria Isabel Velez (INRS Québec) : Evaluation des ressources géothermiques associées aux roches de socle fracturé : le cratère météoritique de Charlevoix (Canada) et le volcan Nevado del Ruiz (Colombie).	16 mai 2019
Maîtrise L. Gauchat (INRS Québec) : Jury d'évaluation. Analyse de la fracturation et de la perméabilité des grès du Groupe Potsdam : implication pour la géothermie profonde.	Juin 2017
Pré-doc M. M. Rajaobelison (INRS Québec) : Jury d'évaluation. Evaluation du potentiel géothermique de Madagascar.	30 août 2017
Thèse P. Ladevèze (Commission Géologique du Canada) : Jury d'évaluation. Aquifères superficiels et ressources profondes : le rôle des failles et des réseaux de fractures naturelles sur les circulations des fluides	30 août 2017
Thèse J. Vidal (Université de Strasbourg). Jury d'évaluation. 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 (Alsace, France).	21 sept 2017
Thèse Paul Baillieux (Université de Neuchâtel). Jury d'évaluation. Multidisciplinary approach to understand the localization of geothermal anomalies inn the upper thine Graben from regional to local scale.	18 décembre 2012
Thèse Sébastien Haffen (Université de Strasbourg). Jury d'évaluation. Caractérisations géothermiques du réservoir gréseux du Buntsandstein d'Alsace.	28 septembre 2012

4. PRINCIPAUX PROJETS SCIENTIFIQUES

Durant ma carrière au BRGM, j'ai participé à plus d'une vingtaine de projets principalement des projets de recherche (20), mais également des projets commerciaux (2) pour des industriels et des projets d'appui aux politiques publiques (2) sur l'exploration géothermique dans les DROM. J'ai été responsable pour 10 d'entre eux et mené des équipes pluridisciplinaires jusqu'à une trentaine de personnes et plus avec les partenaires extérieurs, européens et nationaux.

Quatre des projets de recherche étaient des projets européens dont j'ai été responsable pour l'un d'entre eux (FP7-IMAGE, responsable du sous-projet SP2 avec 20 partenaires européens). Pour les projets nationaux, il s'agissait de financement nationaux de type ADEME ou ANR et même privés (TOTAL). J'ai également monté et mené un projet ANR (ANR CANTARE-Alsace) avec deux partenaires académiques (EOST et LyGHeS de l'Université de Strasbourg) et un partenaire industriel (ES-G).

Projet PEX GTH 3.0 (projet exploratoire interne), cheffe de projet. Evolution des concepts de la géothermie profonde : quelle perspective en France ?	2022-2023
Projet INTERREG DGE-Rollout (Recherche - Europe), cheffe de projet. Accompagner l'expansion de la géothermie profonde en tant que ressource respectueuse du climat et de l'environnement dans le Nord-Ouest de l'Europe et pour favoriser l'économie et le bien-être des citoyens. Etude des calcaires du Dinantien profond comme réservoir géothermique dans les Hauts-de-France.	2019-2023
Projet Exploration géothermique de Petite Terre (Mayotte) (Appui aux Politiques Publiques – Ademe-CD), cheffe de projet. Exploration géothermique de l'île de Petite Terre pour déterminer la localisation préférentielle d'un réservoir géothermique.	2021-2022
Projet SNF (Commercial – Groupe SNF de chimie verte), cheffe de projet. Ressources géothermiques à 60°C à proximité des installations industrielles du groupe SNF.	2022
Projet UNESCO-IGCP 363 (Recherche – UNESCO) : Geothermal resources for energy transition : direct uses and renewable base-load power around the globe. Lead Univ. Colombia. France, Canada, Belgique, Chili, Argentine, Slovaquie, Algérie, Japon, Chine, Nouvelle Zélande, Italie, Islande, Suède, Salvador.	2020-2024
LIA France –Québec (Laboratoire International Associé). Exploitation des ressources profondes et protection des ressources de surface : rapports entre sciences et décisions. INRS, CGC, U Laval, UQAT, Rennes 1, Rennes 2, CNRS, BRGM	2016-2019
Projet UNESCO-IGCP 363 (Recherche – UNESCO). Characterization and sustainable exploitation of geothermal resources. Unifying international research force to unlock and strengthen geothermal exploitation of the America and Europe. Lead Univ. Colombia. France, Canada, Belgique, Chili	2016-2018
Projet CANTARE-Alsace (Recherche – ANR), cheffe de projet. Caractérisation de l'interface socle-couverture dans le fossé rhénan par l'étude pluridisciplinaire et multi échelle d'analogie. Etude de la fracturation en lien avec l'histoire tectonique.	2015-2021
Projet REFLET (Recherche – Géodénergies), montage du projet. Méthodologie pour la réalisation de modèle conceptuel de zone de failles. Etude d'analogie de zones de faille sur la bordure du bassin rhodanien en lien le projet industriel de FONROCHE à Valence.	2013-2020
Projet EGHERI La Réunion (Appui aux Politiques Publiques – Ademe-Dreal), cheffe de projet. Relance de la géothermie sur l'île de La Réunion avec l'identification des secteurs d'intérêt potentiel pour le développement de la géothermie. Synthèse des données anciennes et réalisation d'un SIG et détermination des secteurs d'intérêt.	2014-2015

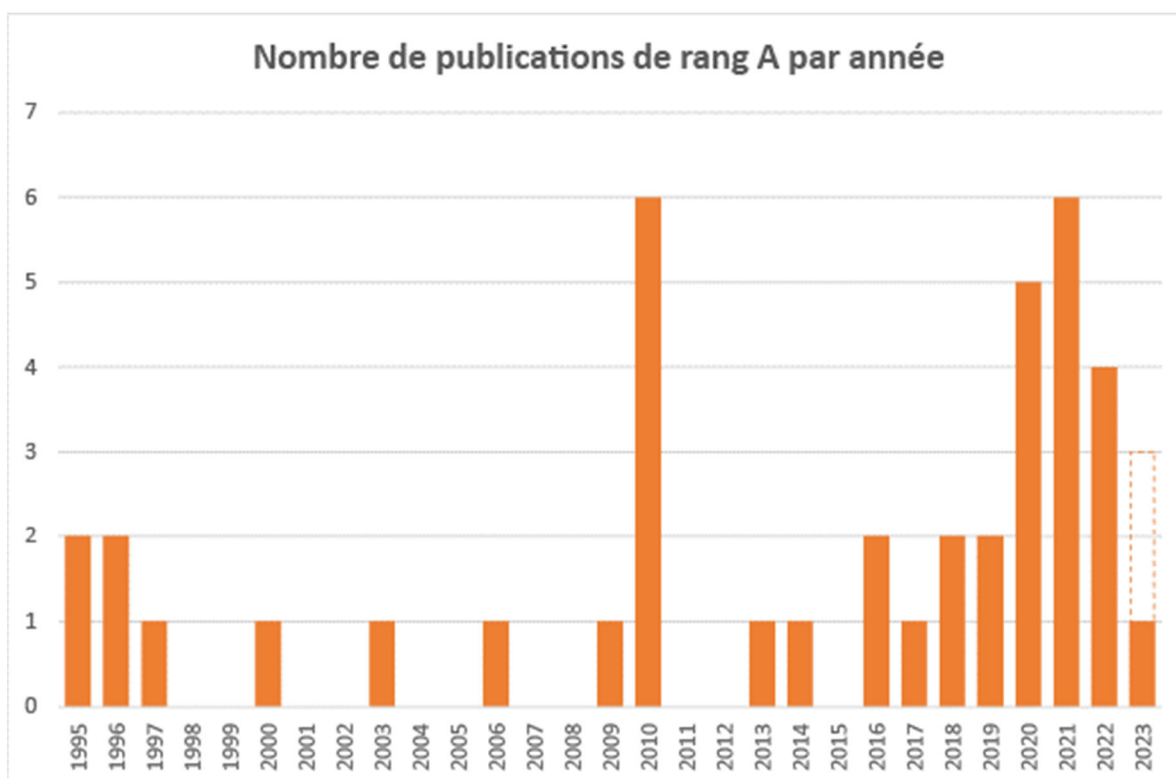
Projet FP7-IMAGE (Recherche – Europe), Integrated Methods for Advanced Geothermal Exploration. Cheffe de projet et leader du SP3 (sub-project) dédié au contexte de bassin et socle. Détermination des éléments clés à la géothermie profonde, développement d’outil d’exploration, synthèse et modélisation géologique.	2013-2017
Projet INTERREG GEOMOL (Recherche – Europe), base de données géothermie et étude du potentiel géothermique du bassin d’Annecy-Genève.	2012-2015
Projet SitoHT (Recherche – financement interne) : Cheffe de projet de mission : analyse des contextes géodynamiques et tectoniques de sites géothermiques haute température remarquables à travers le monde.	2011-2015
Projet TECITUR (Recherche – ADEME) : Cheffe de projet : études des structures tectoniques et relation avec la circulation des fluides au niveau des zones d’anomalies thermiques du fossé rhénan	2011-2015
Projet CLASTIQ 2 (Recherche – ADEME) : Etude de la transition permo-trias / socle cristallin du fossé rhénan à partir de profils sismiques et d’étude de terrain. Analyse structurale de la fracturation et étude minéralogique.	2008-2011
Projet CINERGY (Recherche) – Participation en tant qu’expert en diagraphie. Suivi et analyses des diagraphies sur le chantier du forage scientifique de Chartes-de-Bretagne. Participation au montage de thèse sur la fracturation du Massif Armoricaïn.	2011
Projet INTERREG IV GeORG (Recherche – Europe) : expertise géologique sur le fossé rhénan, sur la modélisation géologique 3D et la détermination du potentiel géothermique.	2009-2014
Projet Réservoirs non conventionnels en domaine de socle fracturé : synthèse des connaissances du BRGM (Recherche - TOTAL), synthèse bibliographique des études menées par le BRGM depuis des années 80 sur la fracturation des socles profonds.	2010
Projet EGS3D (Recherche – ADEME), cheffe de projet : synthèse des données géoscientifiques et intégration des interprétations des profils sismiques verticaux (VSP) sur le site de géothermie profonde EGS de Soultz-sous-Forêts pour la réalisation de modèles géologiques numériques 3D à différentes échelles et la mise en place de recommandations pour l’exploration et l’exploitation des futurs sites équivalents.	2007-2009
Projet MONACO (Projet commercial – gouvernement monégasque), cheffe de projet : étude des potentialités de Monaco par intégration de données géologiques, géophysiques, thermiques et interprétation de profils sismiques. Synthèse des technologies de conversion géothermique pour la production d’électricité.	2007
Projet TIGRÉ (Recherche – TOTAL), cheffe de projet : étude du réseau de fractures et des relations diagénétiques entre les circulations fluides et la matrice dans les grès des Vosges (Buntsandstein) à partir de données de forages et d’affleurements en carrière en bordure du Fossé Rhénan considérés comme des analogues des réservoirs de gaz très peu poreux (Tight Gas Reservoir).	2007-2009
Projet CLASTIQ (Recherche – ADEME) : estimation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias du Fossé Rhénan à deux échelles : (1) à l’échelle du fossé par intégration de données bibliographiques (température, profondeur et épaisseur des réservoirs) sous SIG. (2) à l’échelle d’un secteur à potentiel intéressant à partir d’une étude des profils sismiques et des données de forages, et réalisation d’un modèle 3D.	2006-2008
Projet PICOREF (Recherche – ANR) : étude de la fracturation dans les calcaires de Comblanchien de Bourgogne dans le cadre de projets de recherche sur le stockage de CO ₂ .	2006-2007

Projet GEFRAC (Recherche – ADEME) : étude bibliographique des sites de géothermie HDR/EGS de Fenton Hill (US) et Rosemanowes (UK). Détermination de modèles conceptuels de réservoir pour la modélisation Thermo-Hydro-Mécanique.	2005-2006
Projets SOULTZ (programme de recherche européen) : <ul style="list-style-type: none"> - Suivi géologique des forages géothermiques profonds EGS de Soultz-sous-Forêts (Alsace) du point de vue pétrographique et structural. - Etude de la fracturation utile à l'écoulement dans le cadre des modélisations Thermo-Hydro-Mécaniques et des écoulements 3D dans les réservoirs géothermiques fracturés. - Etude de potentiel géothermique profond EGS dans le Fossé Rhénan et la dépression de la Hesse. 	2002-2007

5. PUBLICATIONS

5.1. Publications internationales à comité de lecture

40 articles publiés dans des revues internationales à comité de lecture dont 8 en première auteure.



L'effet de pépite en 2010 est dû à la fin du projet Soultz qui a donné lieu à un numéro spécial CR Géosciences et d'autres publications. En pointillé, les publications acceptées non encore publiées.

Chabaux F., Lerouge C., Gal F., Viville D., Ranchoux C., Pierret M.-C., van der Woerd J., Delay F., Ackerer J., Ackerer P., Aquilina L., Delay F., Diraison M., Masson F., Mérieux A.-S., Labasque T., Lucas Y., Pézard P., Reuschlé T., Stille P., Zhang X., Wyns R., Négrel P., Dezayes C. (2023) **Water pathway geometry in the critical zone (Strengbach Critical Zone Observatory — France)**. *CR Géosciences N° Spécial en l'honneur de G. de Marsily*. Acceptée.

Miranda M., Raymond J., Dezayes C., Wigston A., Perreault S. (2023) – **Multiscale fracture networks and their impact on hydroshearing response in the Canadian Shield (Kuujuaq, Canada)**. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, sous-presse.

40- Miranda M., Raymond J., Dezayes C. (2023) - **Estimating theoretical stress regime for engineered geothermal energy systems in an arctic community (Kuujuaq, Canada)**. *Compte Rendus Géosciences*, t. 355, pp. 84-108. DOI : [10.5802/crgeos.193](https://doi.org/10.5802/crgeos.193). [hal-04001170](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04001170)

39 - Frey M., van der Vaart J., Bär K., Bossennec C., Calcagno P., Dezayes C., Sass I. (2022) - **Technico-Economic Assessment of Geothermal Resources in the Variscan Basement of the Northern Upper Rhine Graben**. *Natural Resources Research*. DOI : [10.1007/s11053-022-10138-4](https://doi.org/10.1007/s11053-022-10138-4). [hal-03938044](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03938044).

38- Rajaobelison M., Raymond J., Malo M., Dezayes C., Larmagnat S. (2022) - **Understanding heat-transfer along extensional faults: the case of Ambilobe Ambanja geothermal systems in Madagascar**. *Geothermics*, 104, 102455. DOI: [10.1016/j.geothermics.2022.102455](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102455). [hal-03694776](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03694776).

37- Bretaudeau F., Darnet M., Porté J., Lerouge C., Neeb S., Girard J.-F., Baltassat J.-M., Coppo N., Lucas Y., Dezayes C. (2022) – **Geophysical signature of the transition zone between the sedimentary cover and the basement from an analogue of the Rhine Graben**. *Geothermics*, 102, 102356, DOI: [10.1016/j.geothermics.2022.102356](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102356). [hal-03687189](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03687189).

36- Dezayes C., Famin V., Baltassat J.-M., Tourlière B., Bénard B. (2022) - **Potential areas of interest for the development of geothermal energy on Reunion Island based on GIS analysis**. *J. Volc. Geoth. Res.*, 421, 107450. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2021.107450](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107450). [hal-03511687](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03511687)

35- Miranda M., Raymond J., Willis-Richard J., Dezayes C. (2021) – **Are Engineered Geothermal Energy Systems a viable solution for Arctic off-grid communities? Techno-economic a techno-economic study**. *Waters*, 13, 3526. DOI : [10.3390/w13243526](https://doi.org/10.3390/w13243526). [hal-03744325](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03744325)

34- Rajaobelison M., Raymond J., Malo M., Dezayes C., Larmagnat S. (2021) - **Assessment of rock petrophysical properties in North Madagascar: implications for geothermal resource exploration**. *Natural Resources Research*, 30 (5), pp.3261-3287. DOI: [10.1007/s11053-021-09875-9](https://doi.org/10.1007/s11053-021-09875-9). [hal-03745845](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03745845)

33- Frey M., Weinert S., Bär K., van der Vaart J., Dezayes C., Calcagno P., Sass I. (2021) - **Integrated 3D Geological Modelling of the Northern Upper Rhine Graben by Joint Inversion of Gravimetry and Magnetic Data**. *Tectonophysics*, 813, 228927. DOI: [10.1016/j.tecto.2021.228927](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228927). [hal-03234500](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03234500)

32- Miranda M., Velez Marquez M. I., Raymond J., Dezayes C. (2021) - **A numerical approach to infer terrestrial heat flux from shallow temperature profiles in remote northern regions**. *Geothermics*, 93, 102064. DOI: [10.1016/j.geothermics.2021.102064](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102064). [hal-03747365](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03747365).

- 31- Dezayes C., Lerouge C., Innocent C., Lach P. (2021) - **Structural control on fluid circulation in a graben system: constraints from the Saint Pierre Bois Quarry (Vosges, France)**. *J. Struct. Geol.*, vol. 146, 104323. DOI: [10.1016/j.jsg.2021.104323](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104323). [hal-03746458](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03746458).
- 30- Balzan D., López-Sánchez J., Blessent D., Raymond J., Dezayes C., Portela J. P., Restrepo E., Moreno D., Malo M., Goderniaux P., Daniele L., Le Borgne T. (2021) - **An online survey to evaluate the awareness and acceptance of geothermal energy among an educated segment of the population in five European and American countries**. *Geothermal Energy*, 9:9. DOI : [10.1186/s40517-021-00188-x](https://doi.org/10.1186/s40517-021-00188-x). [insu-03163285](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03163285).
- 29- Miranda M, Raymond J, Dezayes C. (2020) - **Uncertainty and risk evaluation of deep geothermal energy source for heat production and electricity generation in remote northern regions**. *Energies*, 13, 4221. DOI: [10.3390/en13164221](https://doi.org/10.3390/en13164221). [hal-03709970](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03709970)
- 28- Rajaobelison M., Raymond J., Malo M., Dezayes C. (2020) – **Classification of geothermal systems in Madagascar**. *Geothermal Energy* 8:22. DOI: [10.1186/s40517-020-00176-7](https://doi.org/10.1186/s40517-020-00176-7). [hal-03710388](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03710388)
- 27- Miranda M., Giordano N., Kanzari I., Raymond J., Pereira A. J. S. C, Dezayes C. (2020) - **Thermophysical properties of surficial rocks; outcrop analogues as tools to assist on the characterization of geothermal resources in remote regions** *Geothermal. Energy*, 8:4. DOI: [10.1186/s40517-020-0159-y](https://doi.org/10.1186/s40517-020-0159-y). [hal-02911813](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02911813)
- 26- Guglielmetti L., Poletto F., Corrubolo P., Bitri A., Dezayes C., Farina B. M., Martin F., Meneghini F., Moscariello A., Nawratil de Bono C., Schleifer A. (2020) - **Results of a walk-above VSP survey acquired at the Thônex-01 Geothermal well (Switzerland) to delineate fractured carbonate formations for geothermal development**. *Geophysical Prospecting*, 68 (4), pp.1139-1153. DOI: [10.1111/1365-2478.12912](https://doi.org/10.1111/1365-2478.12912). [hal-02894880](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02894880)
- 25- Bénard B., Famin V., Agrinier P., Aunay B., Lebeau G., Sanjuan B., Vimeux F., Bardoux G., Dezayes C. (2020) - **Origin and fate of hydrothermal fluids at Piton des Neiges volcano (Réunion Island): a geochemical and isotopic (O, H, C, Sr, Li, Cl) study of thermal springs**. *J. Volc. Geoth. Res.*, 392, pp.106682. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2019.106682](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106682). [hal-02538144](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02538144)
- 24 - Blessent, D., Raymond, J., J. Lopez-Sanchez, Dezayes, C., M. Malo, P. Gorderniaux, L. Daniele, T. Le Borgne, 2019. **The successful experience of IGCP636 project “Unifying international research forces to unlock and strengthen geothermal exploitation of the Americas and Europe”**. *Episodes*, 42 (3): 253-258. DOI: [10.18814/epiugs/2019/019014](https://doi.org/10.18814/epiugs/2019/019014). [hal-02062222](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02062222).
- 23- Dezayes C., Lerouge C. (2019) - **Reconstructing paleofluid circulations at the Hercynian basement/sedimentary cover interface in the Upper Rhine graben**. *Geofluids*, vol. 2019, p.1-30. DOI: [10.1155/2019/4849860](https://doi.org/10.1155/2019/4849860). [hal-02062222](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02062222)
- 22- Kushnir, A.R.L., Heap, M.J., Baud, P., Gilg, H.A., Reuschlé, T., Lerouge, C., Dezayes, C. (2018) - **Characterising the physical properties of the transition zone from the Paleozoic basement to the overlying Permo-Triassic sedimentary sequences in the Upper Rhine Graben**. *Geothermal Energy* 6:16. DOI: [10.1186/s40517-018-0103-6](https://doi.org/10.1186/s40517-018-0103-6). [hal-01937196](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01937196)
- 21- Vidal J., Patrier P., Genter A., Beaufort D., Dezayes C., Glaas C., Lerouge C., Sanjuan B. (2018) - **Clay minerals related to the circulation of geothermal fluids in boreholes at Rittershoffen (Alsace, France)**. *J. Volc. Geoth. Res.*, 349, p. 192-204. DOI : [10.1016/j.jvolgeores.2017.10.019](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.10.019). [hal-01679630](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01679630)
- 20- Chaubaux F., Viville D., Lucas Y., Ackerer J., Ranchoux C., Bosia C., Pierret M.-C., Labasque T., Aquilina L., Wyns R., Lerouge C., Dezayes C., Negrel P. (2017) – **Geochemical tracing and modeling of surface and**

deep water-rock interactions in elementary granitic watersheds (Strengbach and Ringelbach CZOs, France). *Acta Geochim.* 36 (3), pp.363-366. DOI : [10.1007/s11631-017-0163-5](https://doi.org/10.1007/s11631-017-0163-5). [insu-01524691](https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-01524691).

19- Blesent D., Raymond J., [Dezayes C.](https://hal.archives-ouvertes.fr/dezayes) (2016) – **Les ressources géothermiques profondes au Québec et en Colombie, un développement pourrait s’inspirer des centrales géothermiques en France** *Techniques, Sciences, Méthodes n°9*. Ed ASTEE. [hal-03996840](https://hal.archives-ouvertes.fr/03996840).

18- Sanjuan B., Millot R., Innocent C., [Dezayes C.](https://hal.archives-ouvertes.fr/dezayes), Scheiber J., Brach M. (2016) – **Major geochemical characteristics of geothermal brines collected from the granite basement in the Upper Rhine Graben and constraints on their deep temperature and circulation.** *Chemical Geology*, 428, 27-47. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2016.02.021](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.02.021). [hal-01287555](https://hal.archives-ouvertes.fr/01287555).

17- Baillieux P., Shill E., Abdelfettah Y., [Dezayes C.](https://hal.archives-ouvertes.fr/dezayes) (2014) – **Possible natural fluid pathways from gravity pseudo-tomography in the geothermal fields of Northern Alsace (Upper Rhine Graben).** *Geothermal Energy*, 2:16. DOI: [10.1186/s40517-014-0016-y](https://doi.org/10.1186/s40517-014-0016-y). [hal-03996946](https://hal.archives-ouvertes.fr/03996946)

16- Haffen S., Géraud Y., Diraison M., [Dezayes C.](https://hal.archives-ouvertes.fr/dezayes) (2013) – **Determination of fluid-flow zones in a geothermal sandstone reservoir using thermal conductivity and temperature logs.** *Geothermics*, 46, p. 32-41. DOI: [10.1016/j.geothermics.2012.11.001](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.11.001). [hal-00789047](https://hal.archives-ouvertes.fr/00789047).

15- [Dezayes C.](https://hal.archives-ouvertes.fr/dezayes), Genter A., Valley B. (2010) - **Structure of the low permeable naturally fractured geothermal reservoir at Soultz.** *CR Geosciences*, Vol.342, n°7-8, p.517-530. DOI: [10.1016/j.crte.2009.10.002](https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.10.002). [hal-00492278](https://hal.archives-ouvertes.fr/00492278).

14- Sausse J., [Dezayes C.](https://hal.archives-ouvertes.fr/dezayes), Dorbath L., Genter A., Place J. (2010) - **3D fracture zone network at Soultz based on geological data, Image logs, microseismic events and VSP results,** *CR Geosciences*, Vol.342, n°7-8, p.531-545. DOI: [10.1016/j.crte.2010.01.011](https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.01.011). [hal-00558829](https://hal.archives-ouvertes.fr/00558829).

13- Place J., Diraison M., Naville Ch., Géraud Y., Schaming M., [Dezayes C.](https://hal.archives-ouvertes.fr/dezayes) (2010) - **Decoupling of deformation in the Upper Rhine Graben sediments seen by seismic reflection and coupled analysis of diffraction on 3-component Vertical Seismic Profiling (Soultz-sous-Forêts area).** *CR Geosciences*, Vol.342, n°7-8, p.575-586. DOI: [10.1016/j.crte.2010.01.001](https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.01.001). [hal-00542509](https://hal.archives-ouvertes.fr/00542509).

12- Sanjuan B., Millot R., [Dezayes C.](https://hal.archives-ouvertes.fr/dezayes), Brach M. (2010) – **Main characteristics of the deep geothermal brine (5km) at Soultz-sous-Forêts (France) determined using geochemical and tracer test data.** *CR Geosciences*, Vol.342, n°7-8, p.546-559. DOI: [10.1016/j.crte.2009.10.009](https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.10.009). [hal-00558838](https://hal.archives-ouvertes.fr/00558838).

11- Brosse E., Badinier G., Blanchard F., Caspard E., Collin P.Y., Delmas J., [Dezayes C.](https://hal.archives-ouvertes.fr/dezayes), Dreux R. Dufournet A., Durst P., Fillacier S., Garcia D., Grataloup S., Hanot F., Hasanov V., Houel P., Kerevan C., Lansart M., Lescanne M., Manjoz A., Monnet M., Mougou P., Nedelec B., Poutrel A., Rachez X., Renoux P., Rigollet C., Ruffier-Meray V., Saysset S., Thion I., Thoraval A., Videl-Gilbert S. (2010) – **Selection and characterization of geological sites able to host a pilot-scale CO2 storage in the Paris basin (GeoCarbone-PICOREF).** *Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 65, n°3, p.375-403. DOI: [10.2516/ogst/2009085](https://doi.org/10.2516/ogst/2009085). [hal-00505838](https://hal.archives-ouvertes.fr/00505838).

10- Hébert R., Ledésert B, Bartier D., [Dezayes C.](https://hal.archives-ouvertes.fr/dezayes), Genter A., Grall C. (2010) – **The enhanced geothermal system of Soultz-sous-Forêts: a study of the relationship between fracture zones and calcite content.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 196 (1-2), p. 126-133. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2010.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.07.001). [hal-00551332](https://hal.archives-ouvertes.fr/00551332).

9- Ledésert B, Hébert R., Grall C., Genter A., [Dezayes C.](https://hal.archives-ouvertes.fr/dezayes), Bartier D., Gérard, A., (2009) -**Calcimetry as a useful tool for a better knowledge of flow pathways in the Soultz-sous-Forêts Enhanced Geothermal**

System, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 181, p.106-114. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2009.01.001](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.001). [hal-00515825](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00515825).

8- Hooijkaas G.R., Genter A., Dezayes C. (2006) **Deep-seated geology of the granite intrusions at the Soultz EGS site based on data from 5 km-deep boreholes**. *Geothermics*, 35, n°5-6, p. 484-506. DOI: [10.1016/j.geothermics.2006.03.003](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2006.03.003). [hal-03752100](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03752100)

7- Genter A., Guillou-Frottier L., Feybesse J.L., Nicol N., Dezayes C., Schwartz S. (2003) **Typology of potential hot fractured rock resources in Europe.**, *Geothermics*, 32, p. 701-710. DOI: [10.1016/S0375-6505\(03\)00065-8](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00065-8). [hal-00524496](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00524496)

6- Dezayes C., Villemin T. & Pêcher A. (2000) - **Microfracture pattern compared to core scale fractures in the borehole of Soultz-sous-Forêts granite, Rhine graben, France**. *J. Struct. Geol.*, 22, p.723-733. DOI: [10.1016/S0191-8141\(00\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00003-1). [hal-03996964](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03996964)

5- Genter A., Castaing C., Dezayes C., Tenzer H., Traineau H. & Villemin T. (1997) - **Comparative analysis of direct (core) and indirect (borehole imaging tools) collection of fracture data in the Hot Dry Rock reservoir (France)**. *J. Geoph. Res.*, V. 102, B7, p.15419-15431. DOI : [10.1029/97JB00626](https://doi.org/10.1029/97JB00626). [hal-03997002](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03997002)

4- Dezayes C., Genter A. & Villemin T. (1996) - **Fracturation héritée et induite à partir d'images acoustiques et électriques de paroi**. *Bull. Centre Rech. Explor.-Prod. Elf Aquitaine*, 20, 1, p.197-212. [hal-03997045](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03997045)

3- Dezayes C., Villemin T., Genter A. & Angelier J. (1996) - **Origine et signification des fractures de relaxation dans les carottes du forage EPS1 (Soultz-sous-Forêts, Graben du Rhin)**. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 323, série II a, p. 333-340. [hal-03997249](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03997249)

2- Dezayes C., Villemin T., Genter A., Traineau H. & Angelier J. (1995) - **Analysis of fractures in boreholes of the Hot Dry Rock project at Soultz-sous-Forêts (Rhine graben, France)**. *Scientific Drilling*, 5, p. 31-41. [hal-03997382](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03997382)

1- Genter A., Traineau H., Dezayes C., Elsass P., Ledesert B., Meunier A. & Villemin T. (1995) - **Fracture analysis and reservoir characterization of the granitic basement in HDR Soultz project (France)**. *Geotherm. Sci. & Tech.*, 4, 3, p. 189-214. [hal-03997486](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03997486)

5.2. Principales publications de congrès

* Article de colloque

*Dezayes C., Stopin A., Wawrzyniak P., Gal F., Farlotii T., Calcagno P., Armandine les Landes A. (2022) - Exploration of the deep geothermal potential of Petite-Terre Island in Mayotte. Proceedings, 9th African Rift Geothermal Conference. Djibouti, 3rd November – 5th November 2022. ([hal-03799757](#))

Raymond J., Chapelet M., Comeau F.-A., Dezayes C. (2022) - Evaluation of deep geothermal resources in the St. Lawrence Lowlands using shallow thermal response tests. IAH 5. – 7. October 2022, Rogaška Slatina, Slovenia

*Dezayes C., Lacquement F., Capar L., Stopin A., Toussaint E. (2022) - From geological structure to geothermal potential assessment of the Dinantian limestones in northern France. EGC Berlin 2022. ([hal-03511672](#)).

*Dezayes C., Lerouge C., Lach P. (2020) - Characterization of the basement / cover unconformity based on Saint Pierre Bois quarry observations (Rhine Graben, France). EAGE GET 2020 Online Meeting. 16-18 November 2020. ([hal-02928356](#))

*Miranda M., Raymond J., Dezayes C. (2020) - Prospective resource base evaluation for deep geothermal exploration in the remote community of Kuujuaq, northern Québec, Canada. Proposition au 45th Stanford Geothermal Workshop

*Chapelet M., Dezayes C., Dewez T. (2020) - Characterization of fracture network based on photogrammetry. WGC Reykjavik, Avril 2020 ([hal-02390339](#))

*Dezayes C., Lerouge C., Hushnir A., Heap M., Baud P., Girard J-F, Darnet M., Porté J., Chabaux F., Ackerer J., Genter A., Maurer A. (2020) - An analogue Approach to Characterize the Basement-Sediment Transition Zone as a Geothermal Reservoir. WGC Reykjavik, Avril 2020 ([hal-02316021](#))

*Dezayes C. and IMAGE team. A new geothermal exploration workflow for deep sedimentary basins and basement. *European Geothermal Congress - EGC 2019*, Jun 2019, La Haye, Netherlands. ([hal-01870398](#))

Dezayes C., Lerouge C., Kushnir A. (2019) - Characterisation of the basement-sedimentary transition zone in the Saint Pierre Bois quarry (Vosges, France). *GAC-MAC-IAH Conference 2019*, 13-15 May 2019, Québec, Canada. ([hal-01997435](#))

*Lerouge C., Dezayes C., Kushnir A., Duee C., Wille G. (2019) - **The Saint Pierre Bois quarry, an analog site of the Permo-Triassic cover / Hercynian basement transition in the Rhine graben.** EGC The Hague, Netherland, 11-14 June 2019.

*Darnet M., Dezayes C., Girard J.F., Baltassat J.-M., Lerouge C., Reuschlé T., Coppo N., Bretaudeau F., Porté J., Lucas Y. (2019) - **Geophysical signature of the transition zone between the sedimentary cover and the basement: an analogue approach to help de-risking geothermal prospects.** EGC The Hague, Netherland, 11-14 June 2019.

Dezayes C., Genter A., Gentier S. (2019) - **Contribution of the geothermal deep boreholes of the Soultz-sous-Forêts to the understanding of the reservoir and its exploitation.** Journée SGF Forages profonds, Paris, 13-14 février 2019. ([hal-01997434](#))

Dezayes C., Lerouge C., Kushnir A., Heap M., Baud P., J.-F. Girard, Darnet M., Porté J., Chabaux F., Ackerer J., Genter AL, Maurer V. (2018) - **Is the basement-sediment transition zone in the Rhine**

- graben a good geothermal reservoir ? An analogue approach in the CANTARE-Alsace project.** 6th European Geothermal Workshop 10-11 october 2018 Strasbourg, France. [\(hal-01870392\)](#)
- Darnet M., [Dezayes C.](#), Girard J.-F., Baltassat J.-M., Lerouge C., Reuschlé T., Coppo N., Bretaudeau F., Porté J., Lucas Y. (2018) - **Geophysical signature of the transition zone between the sedimentary cover and the basement: an analogue approach to help de-risking geothermal prospects.** 6th European Geothermal Workshop 10-11 october 2018 Strasbourg, France
- López-Sánchez, J., Blesent, D., Malo, M., Raymond, J., [Dezayes, C.](#), Goderniaux, P., Daniele, L., Leborgne, T., Ramírez Respo, E., Portela, J.P., et Hernandez, J.E., 2018. **Social acceptability of deep geothermal energy: overview of an online survey from five European and American countries.** 6th European Geothermal Workshop, Strasbourg.
- Chabaux F., Viville D., Lerouge C., [Dezayes C.](#), Gal F., Ranchoux C., Ackerer J., Pierret M.C., Aquilina L., Pezard Ph., Négrel P. (2018) **Deep water circulations and deep weathering processes in the Strengbach critical zone observatory.** AGU
- [Dezayes C.](#) and IMAGE-SP3 team (2018) - **Toward an exploration method for sedimentary basins and basement.** EUG Vienne (Austria), 9-13 April 2018. [\(hal-01684778\)](#)
- [Dezayes C.](#) and IMAGE-SP3 team (2018) - **Toward an exploration method for sedimentary basins and basement. Ressources for Future Generations.** Vancouver (Canada), 16-21 June 2018. [\(hal-01684787\)](#)
- Lerouge C., [Dezayes C.](#) (2017) **Fluid paleocirculations at the cover/granite interface in the Rhine graben.** in Proceedings of the European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna, Austria
- Armandine Les Landes A., Guillon T., Blaisonneau A., Peter-Borie M., Rachez X., [Dezayes C.](#) (2017) **3D Groundwater flow model at the URG scale to delineate preferential target areas for geothermal projects,** in Proceedings of the European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna, Austria
- *[Dezayes C.](#), Baltassat, J.-M., Famin V., Bes de Berc S. (2016) – **Potential for the development of geothermal energy in La Réunion Island.** European Geothermal Congress, Strasbourg, France, 19-24 Septembre 2016.
- *Genter A., Baujart C., Cuenot N., [Dezayes C.](#), Kohl T., Masson F., Sanjuan B., Scheiber J., Schill E., Schmittbuhl J., Vidal J. (2016) – **Geology, geophysics and geochemistry in the Upper Rhine Graben: the frame for geothermal energy use.** European Geothermal Congress, Strasbourg, France, 19-24 Septembre 2016
- *Van-Wees J.D., Hopman J., [Dezayes Ch.](#), Manzella A., Bruhn D., Scheck-Wenderoth M., Halldorsdottir S., Liotta D. (2015) - **IMAGE: preliminary results on the EU funded research project Integrated Methods for Advanced Geothermal Exploration.** Proceedings WGC 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015, 11 p.
- *[Dezayes, C.](#), Lerouge, C., Sanjuan, B., Ramboz, C., & Brach, M. (2015). **Toward a better understanding of the fluid circulation in the Rhine Graben for a better geothermal exploration of the deep basins.** In *WGC2015 - Melbourne, Australia.* [\(hal-00936646\)](#)
- *[Dezayes, C.](#), Lerouge, C., Ramboz, C., & Wille, G. (2013). **Relative chronology of deep circulations within the fractured basement of the Upper Rhine Graben.** In *EGC 2013 - Pisa, Italy.* [\(hal-00788988\)](#)
- *Haffen S., Géraud Y., Diraison M., [Dezayes C.](#) (2013) – **Fluid-flow zones in a geothermal sandstone reservoir: localization from thermal conductivity and temperature logs, borehole EPS1**

- (Soulz-sous-Forêts, France) and 3D models.** Thirty-Eight Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, February 11-13, 2013.
- Haffen S., Géraud Y., Diraison M., Dezayes C. (2013) - **Petrophysical properties and 3D block model of Buntsandstein Sandstones reservoir (Upper Rhine Graben).** EGU2013; 04/2013
- Haffen S., Géraud Y., Diraison M., Dezayes C. (2012) – **Petrophysical characteristics and fluid flow zones in the Buntsandstein sandstones reservoir according well cores and outcrop analysis (Upper Rhine Graben, France).** EGU General Assembly, Vienna, Austria, 23-27 april 2012. Vol. 14. EGU2012-9127.
- *Baillieux P., Schill E., Moresi L., Abdelfettah Y., Dezayes C. (2012) – **Investigation of natural permeability in graben systems: Soultz EGS site (France).** 37rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 30-February 1, 2012.
- *Dezayes C., Beccaletto L., Oliviero G., Baillieux P., Schill E. (2011) – **3-D visualization of a fractured geothermal field: the exemple of the EGS Soultz site (northern Upper Rhine Graben, France).** 36rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 31-February 2, 2011.
- *Baillieux P., Schill E., Dezayes C. (2011) – **3-D structural regional model of the EGS Soultz site (northern Upper Rhine Graben, France): insights and perspectives.** 36rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 31-February 2, 2011.
- *Hébert R., Ledésert B., Genter A., Bartier D., Dezayes C. (2011) – **Mineral precipitation on geothermal reservoir : the study case of calcite in the Soultz-sous-Forêts enhanced geothermal system.** 36rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 31-February 2, 2011
- *Dezayes C., Genter A., Valley B. (2010) – **Overview of the fracture network at different scales within the granite reservoir of the EGS Soultz site (Alsace, France).** WGC Bali, Indonesia, 25-29 avril 2010.
- *Dezayes C., Thinin I., Courrioux G., Haffen S., Bouchot V. (2010) – **Towards a better knowledge of the Lower Triassic reservoirs in the Upper Rhine Graben.** WGC Bali, Indonesia, 25-29 avril 2010.
- *Massart B., Paillet M., Henrion V., Sausse J., Dezayes C., Genter A., Bisset A. (2010) – **Fracture characterization and stochastic modeling of the granite basement in the HDR Soultz project (France).** WGC Bali, Indonesia, 25-29 avril 2010.
- *Dezayes C., Castera J., Heilbronn G., Calcagno P. (2009) – **Regional 3D model of the Soultz-sous-Forêts geothermal field (Upper Rhine Graben, France).** GRC Reno, USA, 4-8 octobre 2009.
- Dezayes C., Sausse J, Genter A. (2009) – **3D fracture zone network in the crystalline geothermal reservoir of Soultz-sous-Forêts (Upper Rhine Graben, France).** EGU Vienne, Autriche, 19-24 avril 2009.
- Dezayes C., Genter A., Tourlière B. (2008) – **Triassic geothermal Clastic reservoirs in the Upper Rhine Graben.** 22^{ème} RST- 21-24 Avril 2008, Nancy, France.
- Dezayes C., Genter A., Thinin I., Courrioux G. (2008) - **Structures géologiques et estimation du potentiel géothermique : l'exemple du Trias clastique du Fossé rhénan.** 22^{ème} RST- 21-24 Avril 2008, Nancy, France.
- *Dezayes C., Genter A., Thinin I., Courrioux G., Tourlière B. (2008) – **Assessment of geothermal potential of clastic reservoirs in the Upper Rhine Graben.** 3rd International conference & exhibition on ecological vehicles & renewable energies (EVER), 27-30 Mars 2008, Monte-Carlo, Monaco.

- *Dezayes C., Genter A., Thinin I., Courrioux G., Tourlière B. (2008) – **Geothermal potential assessment of clastic reservoirs (Upper Rhine Graben, France)**. 32rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 28-30, 2008.
- *Sausse, J., Dezayes C., Genter A., Bisset, A. (2008) – **Characterization of fracture connectivity and fluid flow pathways derived from geological interpretation and 3 D modelling of the deep seated EGS reservoir of Soultz (France)**. 32rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 28-30, 2008.
- *Dezayes C., Thinin I., Genter A., Courrioux G. (2007) **Clastic reservoirs in the Rhine graben: geothermal potential of the Triassic sandstones based on seismic profiles and deep boreholes**, in EGC 2007 - European Geothermal Congress - 30/05-01/06/2007 - Unterhaching – Germany.
- *Sausse.J., Dezayes C., Genter A. (2007) **From geological interpretation and 3D modelling to the characterisation of the deep seated BGS reservoir of Soultz (France)**, in EGC 2007 - European Geothermal Congress - 30/05-01/06/2007 - Unterhaching - Germany
- *Gentier S., Rachez X., Dezayes C., Blaisonneau A., Genter A. (2005) **How to understand the effect of the hydraulic stimulation in term of hydro-mechanical behavior at Soultz-sous-Forêts (France)?** in Geothermal Resources Council - Annual Meeting - Reno - Nevada - USA - 29/08-01/09/2004 – *GRC Transaction*, Vol. 29, p. 213-218.
- *Dezayes C., Genter A., Hooijkaas.G.R. (2004) **Deep-seated geology and fracture system of the EGS Soultz reservoir (France) based on recent 5km depth boreholes**, in WGC 2005 - World Geothermal Congress - Antalya - Turquie - 24-29 April 2005.
- Dezayes C., Genter A., Homeier.G., Stein.G. (2003) **Fracture network at 5 km depth within the Rhine Graben based on acoustic borehole imageries**, in EGS - AGU - EUG joint Assembly - 28th - Nice - France - 06-11/04/2003.
- Dezayes C., Villemin.T., Richon.P., Pili.E. (2003) **Fracture pattern in a gneiss complex and its relationship with present-day fluid circulations in the Roselend underground gallery (French Alps)**, in EGS - AGU - EUG joint Assembly - 28th - Nice - France - 06-11/04/2003.
- Richon.P., Perrier.F., Sabroux.J.C., Pili.E., Ferry.C., Dezayes C., Voisin.V. (2003) **Ventilation, air confinement and high radon level in an underground gallery studied from profiles measurements.**, in EGS - AGU - EUG joint Assembly - 28th - Nice - France - 06-11/04/2003.
- Dezayes C., Genter A., Maqua.E., Stein G. (2003) **Granite intrusions and fracture system in the Soultz HFR geothermal reservoir.**, in Structures in the Continental Crust and Geothermal Resources - Siena (Italy) - 24-27/09/2003, P.46-48.
- Dezayes C. & Kirkwood D. (1998). - **Relationship between fracture network and present-day flow in the CANMET Experimental Mine, Val d'Or, Québec**. GAC-MAC, Quebec 18-20 Mai 1998.
- Dezayes C., Villemin T., Genter A., Traineau H. & Angelier J. (1993) - **Paleostress analysis from fault and fracture geometry in the Hot Dry Rock boreholes at Soultz-sous-Forêts (Rhinegraben)**. European Union of Geosciences EUG VII, Strasbourg 4-8 April 1993, *Terra Nova* 5, p. 217.

5.3. Relecture d'articles à comité de lecture

2023 - Solid Earth Sciences.

2022 - Geothermics.

2021 – Geothermics.

2021 - J. Struct. Geol.

2020 - Nature Reviews

2020 - Geothermics.

2020 - BSGF

2019 - J. Struct. Geol.

2019 – Geothermal Energy: Science, Society, and Technology

2019 - Environmental Earth Sciences.

2019 – J. Struct. Geol.

2018 - Acta Geologica Sinica

2018 - Geofluids Special Issue « Geothermal Systems : interdisciplinary Approaches for an Effective Exploration »

2018 - Geothermal Energy

2018 - Tectonics

2017 - Geothermics

2017 - Geothermal Energy

2017 - Geothermal Energy

2014 – Journal of Petroleum Research

2014 - Journal of Maps.

2014 - Geothermics

2014 - Geothermics

2007 - Comptes rendus de l'Académie des Sciences

2007 - Comptes rendus de l'Académie des Sciences

6. ANIMATION DE LA RECHERCHE

Principales organisations de rencontres :

- Webseminar France-Chili "Geothermal Paris Basin" 16 janvier 2022, "Geothermal energy in Chile" 19 janvier 2022.
- INTERREG DGE Rollout : project meeting Lille 24 au 26 novembre 2021 (30 participants)
- UNESCO-IGCP636 : séminaire Orléans (visite de l'installation géothermique de Villejuif) et EGW Strasbourg, 8 au 12 octobre 2018 (20 participants)
- 28^{ème} Entretiens Jacques Cartier, France-Québec, colloque 15, « Les ressources en eau et en énergie souterraines face au changement climatique ». Université Savoie-Mont Blanc, Chambéry, 2 et 3 décembre 2015
- FP7-IMAGE : project meeting Orléans 14 au 15 avril 2014 (40 participants)

Editrice associée à Geothermal Energy depuis 2021

Evaluation de projets pour le compte de :

- FRQNT (Fond de Recherche Québécois sur la Nature et les Technologies) - 2017
- ITI GeoT (Université de Strasbourg) depuis 2021

Membre du Comité Scientifique de l'Institut Thématique Interdisciplinaire Géosciences pour la Transition Energétique depuis 2021

Membre du Conseil de Perfectionnement Master GEOSSEN (Géosciences pour l'Energie) à l'Université de Cergy Pontoise depuis 2021.

Membre du Comité Consultatif du projet DIAMONDS " Dynamic integrated assessment methods for the sustainable development of the subsurface. The Campine Basin case" porté par l'Université d'Anvers depuis 2021

Correspondante scientifique depuis 2011 sur la thématique géothermie et plus récemment stockage. Cela consiste principalement à animer et coordonner les réponses aux appels à projets de recherche publiques nationaux (ANR, ADEME, Région...), européens et interne, mais également les montages de projets en lien avec les entreprises privés et les collectivités pour l'appui aux politiques publiques.

Avancées scientifiques

Depuis ma thèse de doctorat, mes activités de recherche ont gravité autour de la compréhension des systèmes géothermaux fracturés, en passant d'une part par leur caractérisation et leur représentation de l'échelle microscopique à l'échelle régionale, et d'autre part par la compréhension de la circulation des fluides dans ce type de milieu.

Le réseau de fractures est, en effet, un élément prépondérant dans la circulation des fluides en milieu profond et peu perméable tels que les granites, les roches volcaniques non altérées et même les roches sédimentaires dites « tight » telles que les grès silicifiés.

A partir des années 80 et surtout 90, les ingénieurs réservoirs ont commencé à s'intéresser aux réservoirs fracturés qui pouvaient contenir d'importantes réserves de pétrole et de gaz (Nelson, 2001; Trice *et al.*, 2022), ainsi que des fluides hydrothermaux (Genter *et al.*, 1995). Le rôle de la géologie structurale est alors devenu prépondérant dans le but d'intégrer les réseaux de fractures dans les modèles de réservoir et améliorer ainsi les prédictions de productivité (Nelson, 2001).

Les propriétés des réservoirs sont en lien avec celles de la matrice rocheuse auxquelles s'ajoutent alors celles des fractures. Les effets du réseau de fractures sur la qualité globale du réservoir permet de les classer en quatre types définis initialement pour les réservoirs pétroliers (Nelson, 2001; Figure 1) :

- Type I : les fractures apportent la porosité et la perméabilité essentielle au réservoir ;
- Type II : les fractures apportent la perméabilité et la matrice la porosité ;
- Type III : les fractures favorisent la perméabilité du réservoir déjà exploitable par la matrice ;
- Type IV : les fractures n'apportent ni porosité, ni perméabilité mais créent une hétérogénéité et compartimentent le réservoir.

Les principaux réservoirs géothermiques peuvent être replacés dans cette classification (Figure 1) :

- Le Dogger du Bassin de Paris constitue un aquifère dont les porosités et perméabilités moyennes sont respectivement de 15-20% et autour de 10^{-12}m^2 à l'échelle du réservoir (Lopez *et al.*, 2010). Les failles affectent peu le réservoir mais peuvent constituer des compartiments pouvant expliquer l'absence de productivité de certains forages comme à Grigny par exemple. Le réservoir du Dogger est donc considéré comme un réservoir de type IV ;
- Le réservoir de Bouillante, en Guadeloupe, est constitué de séries volcano-sédimentaires hydrothermalisées affectées par un système de failles perpendiculaires (Calcagno *et al.*, 2012) qui contribue en partie à la circulation des fluides. Les valeurs de porosité et de perméabilité de la matrice déduites des modélisations du réservoir sont d'environ 10% et 10^{-15}m^2 et pour les failles de 1% et de 10^{-13}m^2 (Hamm *et al.*, 2016). Ce réservoir peut donc être considéré comme un réservoir de type III ;
- Les grès et la zone de transition avec le socle en fond de bassin dans le Fossé Rhéan sont caractérisés par une matrice silicifiée possédant des valeurs moyennes de porosité entre 5 et 10% et de perméabilité entre 10^{-19} et 10^{-18}m^2 mesurées sur échantillons (Kushnir *et al.*, 2018). Ces niveaux exploités à Landau sont traversés par des zones de

failles qui contribuent en partie aux propriétés réservoirs (Baumgartner *et al.*, 2010). Ces formations peuvent être considérées comme des réservoirs de type II ;

- Le réservoir de Soultz est constitué d'un granite affecté par des zones de failles, le plus souvent altérées à leurs épontes, découpant des blocs eux-mêmes fracturés (Dezayes *et al.*, 2010 ; Genter *et al.*, 2000). Ces discontinuités contribuent à la porosité, de par les épontes altérées, et à la perméabilité du réservoir, alors considéré comme un réservoir de type I.

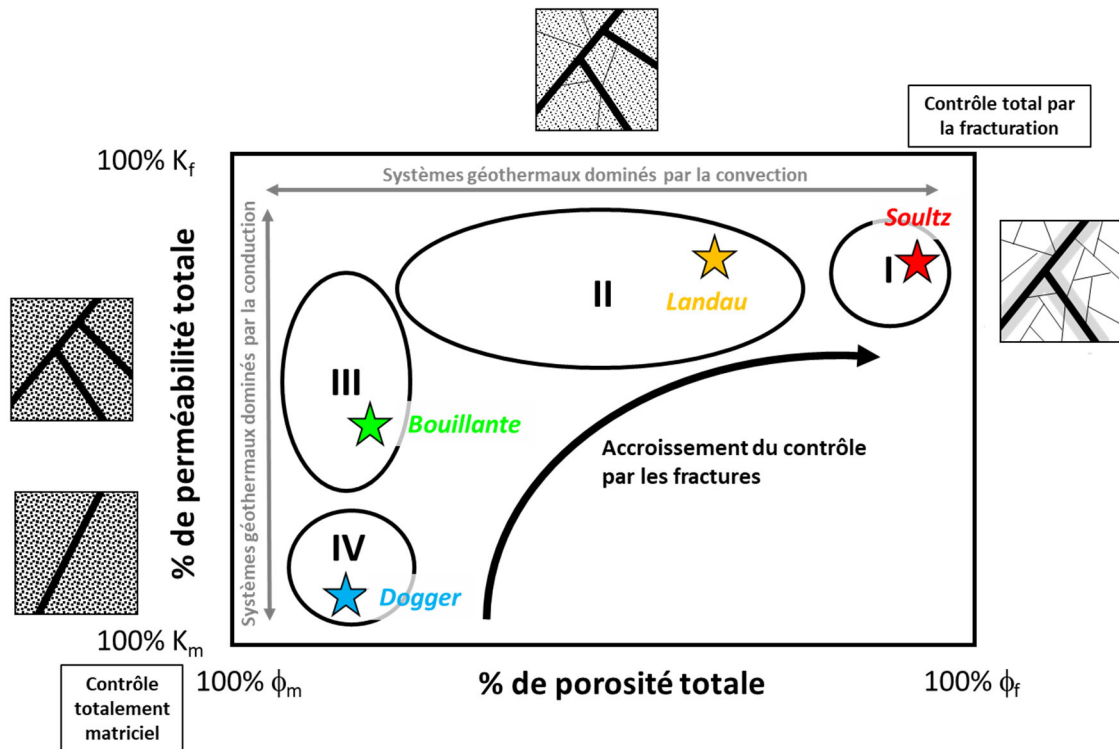


Figure 1 – Classification des réservoirs fracturés en fonction de la porosité du réservoir par rapport à sa perméabilité (pourcentage dû à la matrice par rapport au pourcentage contrôlé par les fractures) (d'après Nelson, 2001). En gris, les systèmes géothermaux d'après le classement de Moeck (2014).

C'est donc dans le contexte du développement de la géothermie vers des réservoirs non plus totalement poreux mais également fracturés, que s'inscrit le démarrage de mon cheminement scientifique qui a commencé à Soultz et s'est poursuivi vers des réservoirs plus conventionnels, volcaniques ou carbonatés, pour y introduire la dimension fracturation.

Ce cheminement est présenté dans cette première partie du mémoire qui décrit les avancées scientifiques de mon travail mettant l'accent sur la compréhension du rôle de la fracturation dans les réservoirs géothermaux. Le premier chapitre sera consacré à la caractérisation de la fracturation, son organisation et sa mise en place. Le deuxième chapitre traitera de la représentation des réseaux fracturés en 3D à l'échelle du réservoir et à l'échelle régionale. Et enfin, le troisième chapitre abordera la circulation des fluides profonds dans les réseaux fracturés. Ces travaux s'appuient sur des publications dont les liens sont présents dans le texte.

1. CARACTERISATION DES MILIEUX GEOTHERMAUX PROFONDS FRACTURES EN DOMAINE DE SOCLE CRISTALLIN

La compréhension des systèmes géothermaux fracturés profonds débute par la caractérisation de la fracturation, d'une part au sens géométrique (orientation, densité, répartition, ...) et d'autre part au sens génétique, c'est-à-dire en lien avec la mise en place de cette fracturation.

Les fractures sont des discontinués qui affectent la roche suite à une contrainte tectonique et/ou thermique, excepté en proche surface où elles peuvent être produites par la décompression et le gel (Peacock *et al.*, 2016). Elles affectent toutes les roches, quel que soit leur formation et leur contexte. Ce sont des objets géologiques qui peuvent être complexe par leur origine et leur développement étroitement liées à l'histoire géologique (tectonique et/ou thermique) du massif. Elles ont des propriétés d'échelle, c'est-à-dire qu'elles ont des agencements équivalents à toutes les échelles, et sont présentes depuis l'échelle du minéral (Anders *et al.*, 2014) jusqu'à l'échelle régionale (Peacock *et al.*, 2016).

Le terme de fracture a été défini de différentes manières suivant les centres d'intérêts des auteurs. Certaines définitions sont plutôt descriptives, d'autres plutôt mécaniques (Peacock *et al.*, 2018). Mes travaux sont plutôt de l'ordre du descriptif et portent sur tous types de discontinuités tectoniques telles que les failles, les fractures, les fissures, les joints, les diaclases, les fentes, les veines et les filons. Les failles sont définies par un mouvement présent entre les blocs, qu'il soit horizontal (décrochement) ou vertical (normal ou inverse). Le terme de faille est également utilisé de manière générique à large échelle, pour décrire des discontinuités de dimensions régionales et au-delà (plusieurs kilomètres à plusieurs centaines de kilomètres).

Les fissures, joints, diaclases sont des discontinuités sans déplacement visible sur le plan de rupture. Le terme de fissure est généralement associé à une dimension inférieure à 1 mètre. Les joints et les diaclases sont plutôt employés dans des contextes de roches sédimentaires, les diaclases étant en plus associées à des phénomènes de dissolution et de karstification. Dans les autres contextes, magmatiques ou métamorphiques, le terme de fracture est plus largement utilisé ainsi que celui de fente, lorsque la fracture présente une ouverture libre (vide), et de veine ou de filon, si un remplissage minéralogique ou magmatique est présent.

Dans la suite du manuscrit, seront le plus généralement employés les termes de « fracture », pour indiquer tous types de discontinuités, de « faille », si un mouvement des blocs est avéré ou de « zone de failles » pour les structures de grande dimension constituées de nombreuses fractures ou failles, et de « veine » et de « fente », si un remplissage minéralogique est observé.

1.1. Organisation de la fracturation

L'apparition d'un nouveau concept de géothermie profonde dans les années 70 visait à produire de l'électricité en dehors des zones de production conventionnelle que sont les réservoirs perméables en contexte volcanique à fort gradient géothermal. L'idée, développée au départ par les américains du Los Alamos National Laboratory (LANL) avec le démonstrateur de Fenton Hill, était de créer une boucle de circulation de fluide entre deux ou plusieurs puits connectés en profondeur par une fracture créée artificiellement à l'aide de fracturation hydraulique (Brown, 1995; Potter *et al.*, 1974). Ce concept partait alors de l'hypothèse que le milieu ciblé en profondeur, un socle cristallin, était homogène du point de vue lithologique, non fracturé, exempt de fluide et chaud puisque profond, d'où l'appellation de système Hot Dry Rock ou HDR. Une fracture « contrôlée », en termes d'orientation et d'extension, était alors créée et permettait la circulation et le réchauffement d'un fluide injecté dans le massif.

Ce concept, qui avait pour ambition de faire de la géothermie n'importe où dans le monde, a été suivi en Europe par les projets de Rosemanowes au Royaume-Uni (Parker, 1999), Bad Urach en Allemagne et Soultz-sous-Forêts en France (Gérard *et al.*, 1987). Ces démonstrateurs ont tous montré un milieu hétérogène où la création d'une fracture, de direction contrôlée ou non, est quasi impossible.

A Soultz-sous-Forêts, le premier forage GPK1, foré en 1987 jusqu'à une profondeur de 2000 m dans un premier temps, a révélé un milieu granitique fracturé et dans lequel était présent un fluide chaud (Figure 2). Après l'approfondissement de GPK1 à 3500 m et le forage de GPK2 à 3800 m, les premiers tests de circulation entre ces deux puits ont été réalisés en 1995 et 1996 sur une courte durée, puis en 1997 sur une période longue de 4 mois. Il a alors été démontré que du fluide circule dans le réseau de fractures qui constitue dès lors le réservoir géothermique. La compréhension du réservoir ayant évolué, il a donc été nécessaire de caractériser l'organisation de ce réseau de fractures afin de comprendre les chemins de circulation, d'une part, et d'optimiser les stimulations, d'autre part. Ces stimulations avaient alors pour but de rouvrir, de façon irréversible, les fractures colmatées par des dépôts pour permettre d'améliorer la perméabilité du réservoir. Dès lors est né le concept EGS pour Enhanced Geothermal System ou système géothermique amélioré par l'augmentation artificielle de la perméabilité.

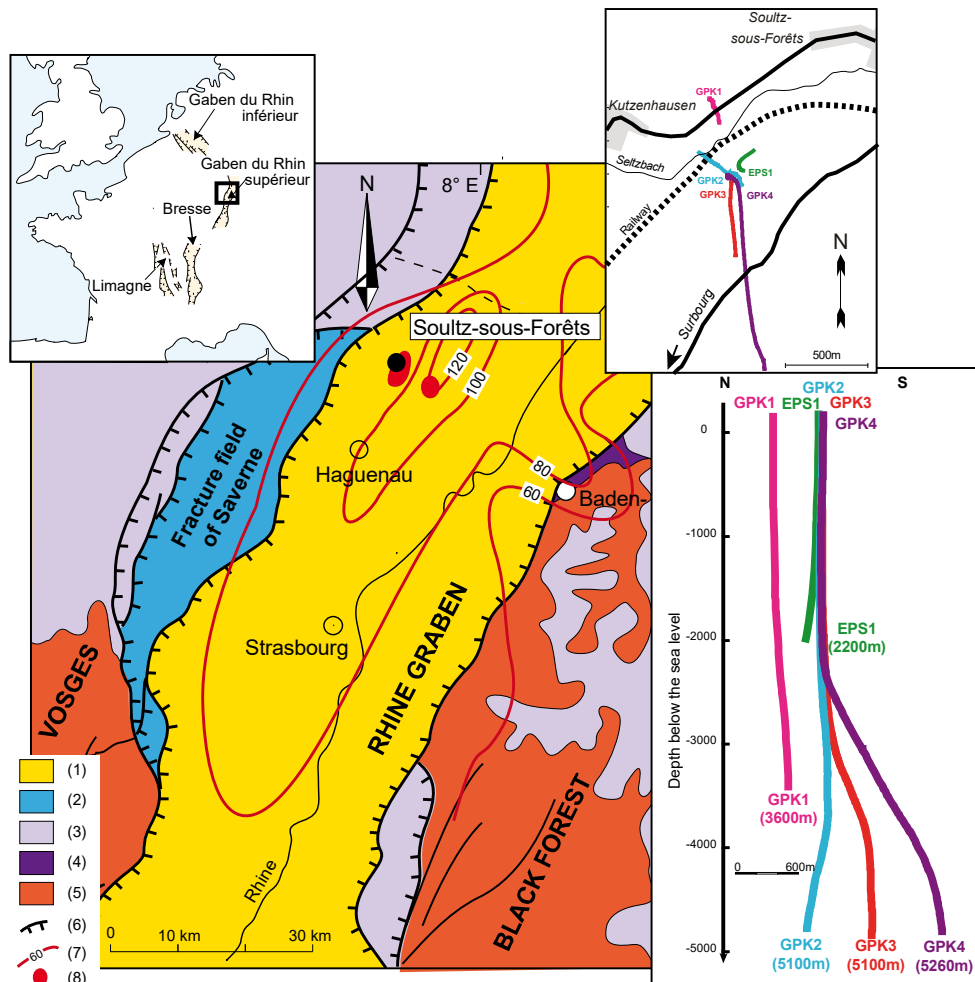


Figure 2 – Localisation du site de Soultz-sous-Forêts dans le Fossé Rhénan et tracé des puits en carte et en coupe. (1) sédiments cénozoïques (2) volcanisme cénozoïque (3) Jurassique (4) Trias (5) socle hercynien (6) failles bordières du fossé (7) failles (8) distribution des températures à 1500m en °C (Haenel *et al.*, 1979). (9) anomalies thermiques locales (Haenel *et al.*, 1979).

Ainsi, afin de caractériser au mieux le réseau de fractures de Soultz, un forage carotté, EPS1, a été réalisé en 1990 jusqu'à 2227m de profondeur afin d'avoir accès plus directement aux informations géologiques directes. Outre les aspects pétrographiques et minéralogiques du granite constituant ce réservoir, la description de l'organisation spatiale des fractures, leur qualification, leur remplissage minéralogique, etc..., a pu être réalisée pour caractériser le réseau de fractures, au moins en proche puits.

Mes premiers travaux de recherche ont alors consisté en l'analyse de l'organisation spatiale des fractures dans les premiers puits GPK1 et EPS1 de Soultz, ce qui a fait l'objet du premier article présenté ci-dessous (Dezayes *et al.*, 1995). Les principaux résultats scientifiques de ces recherches ont montré d'une part que les paléo-états de contrainte déduits de l'inversion des failles striées observées sur les carottes sont en lien avec les quatre phases tectoniques successives qu'a subies la région au Cénozoïque (Villemin *et al.*, 1987), à savoir :

- une compression N20°E à l'Eocène avec σ_2 quasi verticale ;
- une extension N100°E à l'Oligocène avec σ_1 quasi verticale ;
- une compression N80°E au début Miocène avec σ_2 inclinée ;
- une compression N120°E depuis la fin du Miocène et maintenu jusqu'à l'Actuel avec σ_2 inclinée.

D'autre part, les fractures sont organisées en familles directionnelles conjuguées relativement subméridiennes qui ne correspondent pas précisément aux paléocontraintes calculées à partir des failles striées ce qui implique que ces fractures sont antérieures aux mouvements et que probablement une bonne partie de ces failles sont le résultat de la réactivation de fractures anciennes.

Analysis of fractures in boreholes of the Hot Dry Rock project at Sultz-sous-Forêts (Rhine graben, France)

CH. Dezayes¹, T. Villemin¹, A. Genter², H. Traineau² and J. Angelier³

¹ Laboratoire de Géodynamique & U.R.A. C.N.R.S. 69, Université de Savoie, 73376 Le Bourget du Lac, France

² BRGM, Direction de la Recherche, Département Géophysique et Imagerie Géologique, BP 6009, 45060 Orléans Cedex 2, France

³ Laboratoire de Tectonique Quantitative, Université P. & M. Curie, Boîte 129, 75252 Paris Cedex 5, France

Abstract. The Hot Dry Rock (HDR) geothermal drill site is located in the Upper Rhine Graben at Sultz-sous-Forêts (Alsace, France). Two boreholes reach a highly fractured basement of porphyritic granite, potential site for a geothermal reservoir. Data from the striated faults observed on cores enabled us to compute the paleostress tensors corresponding to the tectonic regimes that affected the granite. Four stress states have thus been determined: a N20°E compression, an N100°E extension, a N80°E compression and a N120°E compression. Both natural and induced fractures were recognised in cores. The mean strike of natural fractures changes progressively with depth from N170°E to N200°E. These fractures form conjugate systems and their dip direction average N70°E and N270°E (natural fractures) and N100°E-110°E and N270°E (induced fractures). The main orientations of fractures analysed from the borehole images are similar to those deduced from core analysis, but with less dispersion. The four stress states computed with striated faults correspond to the regional tectonic history. The direction of the last compression corresponds to the present-day horizontal maximum stress axis, as suggested by the orientation of induced fractures identifiable on the borehole images. A rotation of the core-induced fractures with depth is probably due to stress perturbation related to the presence of an important fault close to the geothermal drillsite.

Introduction

The porphyritic granite underlying the Tertiary of the upper Rhine Graben offers potential sites for geothermal reservoir. Geothermal exploitation would involve creating a heat exchanger between two deep boreholes 500 m apart. Fresh water, injected into one borehole will be recovered hot from the other. The determination of fracture permeability and potential for hydraulic fracturing plays a major role in the geothermal investigation. To design this

reservoir, the knowledge of both the fracture pattern in the granite and the orientation of the present-day stress field is required. As a result, extensive analyses of 3-D fracture patterns and stress regimes were undertaken.

The drill site at Sultz-sous-Forêts is located on a significant positive thermal anomaly, near the old Pechelbronn oil field (Fig. 1). Numerous subsurface data are available, resulting in an excellent structural knowledge of the Oligocene extensional structure (Schnaebele, 1948). The temperature at the depth of

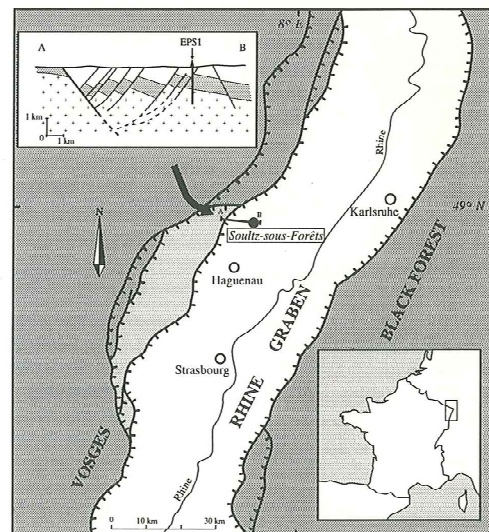


Fig. 1 : Location of the geothermal drill site of Sultz-sous-Forêts within the Rhine graben. Vertical section AB: cross pattern, granite basement; grey, mesozoic sediments; white, Oligocene and Miocene filling sediments.

[Dezayes et al. \(1995\) - Analysis of fractures in boreholes of Hot Dry Rock project at Sultz-sous-Forêts \(Rhine Graben, France\)](#)

Outre l'orientation, la distribution des fractures dans l'espace est également un paramètre important à prendre en compte lorsqu'on cherche à comprendre les circulations des fluides dans un massif. A Soultz, la distribution spatiale des fractures a pu être mise en évidence dans les puits profonds GPK2, GPK3 et GPK4 qui ont atteint 5000 m de profondeur et dans lesquels toutes une série de diagraphies (GR spectral, densité, caliper, etc...) et surtout d'imageries de paroi (principalement BHTV/UBI, mais également FMS/FMI) ont été réalisées.

L'étude de ce jeu exceptionnel de données a été réalisée dans l'optique de servir de base à la modélisation des circulations des fluides permettant de comprendre le réservoir fracturé de Soultz. Les résultats scientifiques sont principalement reportés dans la publication ci-dessous extrait d'un numéro spécial des Comptes Rendus Géosciences réalisé à la fin de la phase scientifique du projet de démonstrateur du Soultz (Dezayes *et al.*, 2010). Il apparaît que le réseau de fractures est constitué de zones de failles connectées à un réseau dense de fractures secondaires. Les fractures comme les zones de failles sont organisées en cluster avec des variations de densité significatives le long des puits (Figure 3). L'orientation principale de ces clusters est en lien avec les zones de faille majeures se présentant comme la famille antithétique à ces zones de failles.

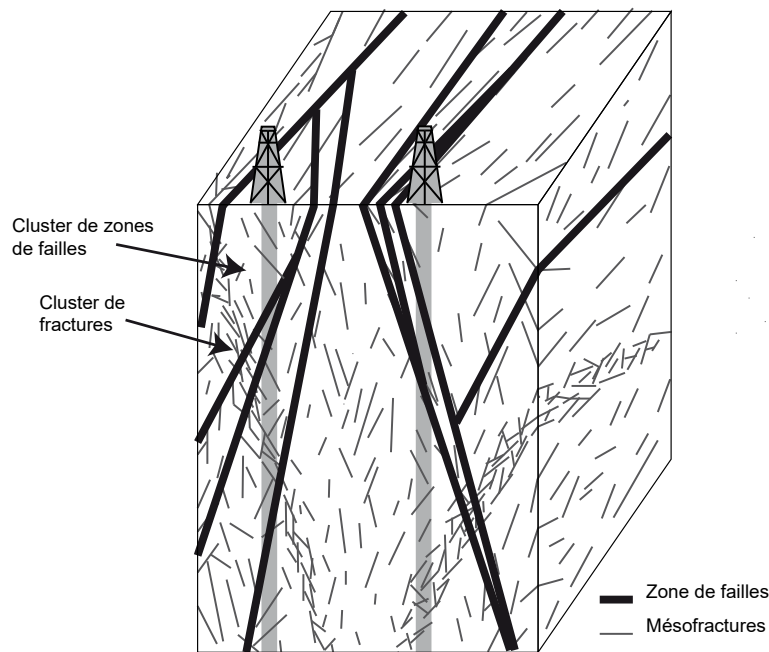


Figure 3 – Schéma conceptuel du réservoir fracturé de Soultz



Contents lists available at ScienceDirect

Comptes Rendus Geoscience

www.sciencedirect.com



Tectonics

Structure of the low permeable naturally fractured geothermal reservoir at Soultz

Structure du réseau de fractures naturelles dans le réservoir géothermique peu perméable de Soultz

Chrystel Dezayes^{a,*}, Albert Genter^b, Benoît Valley^{c,1}

^aBRGM, Geothermal Department, 3, avenue C.-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans cedex 2, France

^bGEIE exploitation minière de la chaleur, route de Soultz, BP 40038, 67250 Kutzenhausen, France

^cETH Zürich, Engineering Geology, CH-8093 Zürich, Switzerland

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 October 2008

Accepted after revision 19 September 2009

Available online 29 December 2009

Written on invitation of the Editorial Board

Keywords:

Rhine Graben

Fractures

Fracture zones

Cores

Borehole images

Enhanced Geothermal System

Mots clés :

Fossé rhénan

Fractures

Zones de fractures

Carottes

Image de paroi

Système Géothermique Stimulé

ABSTRACT

The permeability of the granite geothermal reservoir of Soultz is primarily related to major fracture zones, which, in turn, are connected to dense networks of small-scale fractures. The small-scale fractures are nearly vertical and the major direction is about N0°E. This direction differs from that of the Rhine Graben, which is about N20°E to N45°E in northern Alsace. A total of 39 fracture zones, with a general strike of N160°E, have been identified in six wells between 1400 and 5000 m depth. These fracture zones are spatially concentrated in three clusters. The upper cluster at 1800–2000 m True Vertical Depth (TVD) is highly permeable. At 3000–3400 m TVD, the intermediate cluster in composed of a dense network developed in an altered matrix and forms the upper reservoir. In the lower part of the wells, the deeper cluster appears as a fractured reservoir developed within a low permeable matrix. Fracture zones represent a key element to take into account for predicting the geothermal reservoir life time submitted to various thermo-hydro-mechanical and chemical processes generated by hydraulic or chemical stimulations and by hydraulic circulation tests related to long-term exploitation.

© 2009 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

RÉSUMÉ

Le réservoir géothermique de Soultz est constitué de zones de fracture majeures connectées à un réseau dense de fractures secondaires. Les mésofractures sont pratiquement verticales et la direction majeure est à peu près nord-sud. Cette direction diffère de la direction régionale du fossé rhénan qui est localement à dominante N20°E à N45°E dans le Nord de l'Alsace. Un total de 39 zones de fracture a été identifié et caractérisé dans six puits entre 1400 et 5000 m de profondeur. Ces structures sont réparties en trois clusters suivant la profondeur. Le premier cluster à 1800–2000 m TVD (profondeur verticale) est très perméable naturellement. À 3000–3400 m TVD, le cluster intermédiaire apparaît comme un réseau plus dense dans un milieu plus altéré et constitue le réservoir supérieur. Dans la partie inférieure des puits, le cluster profond apparaît comme un réservoir fracturé développé dans une matrice très peu perméable. La caractérisation des zones de fracture représente un élément important à prendre en compte pour la prévision

* Corresponding author.

E-mail address: c.dezayes@brgm.fr (C. Dezayes).

¹ Present address: MIRARCO/Laurentian University, 935, Ramsey Lake Road, Sudbury, ON P3E 2C6, Canada.

Afin de mettre en évidence les effets d'échelle de la fracturation du granite de Soultz, nous avons réalisé une étude originale de l'organisation de la microfracturation dans les cristaux de quartz du granite qui se manifeste comme des trainées d'inclusions fluides. Cette étude a été réalisée sur des lames épaisses des carottes d'EPS1 qui ont été taillées suivant les trois directions perpendiculaires de l'espace (une horizontale et deux verticales) à une même profondeur. L'orientation des carottes étant connue, les lames minces ont pu être orientées dans l'espace et les trainées d'inclusion fluide également. L'inclinaison des plans de fracture est déterminée en fonction de l'épaisseur de la lame et en mesurant le déplacement latéral de la trainée lorsqu'on change le focus du microscope entre le haut et le bas de la lame. L'inclinaison mesurée n'est évidemment qu'apparente dans le plan de la lame et une combinaison statistique des mesures sur les trois lames permet une reconstitution du réseau de microfractures en 3 dimensions.

Les résultats sont présentés dans l'article ci-après (Dezayes *et al.*, 2000) et montrent que l'orientation de la famille principale des microfractures est subméridienne et équivalente à celle des mésofractures ce qui confirme le caractère multi-échelle de la fracturation. En revanche, une famille supplémentaire de direction globalement E-W est présente à l'échelle microscopique qui pourrait s'expliquer par la présence de perturbations locales des contraintes au niveau des grains de quartz. Cependant, cette direction E-W n'est pas totalement absente de la mésofracturation, ni même des fractures observées sur les analogues dans les Vosges et en Forêt Noire.

Il est évident que dans le cas d'un massif profond reconnu par forage, les carottes apportent des informations indéniables pour caractériser le réseau de fractures. Cependant, si les carottes apparaissent évidentes pour l'observation et la caractérisation minéralogique des remplissages et des altérations, elles le sont moins pour caractériser la géométrie, et en particulier l'orientation des fractures, tant leur orientation elle-même est une opération fastidieuse et requérant de toute façon des images de paroi. Bien que les images ne détectent qu'environ 20% des fractures visibles à l'œil sur les carottes, il a été montré qu'il n'y avait pas de biais statistique sur les orientations (Genter *et al.*, 1997). Ces acquisitions permettent d'obtenir rapidement et à moindre coût de nombreuses données et informations sur la géométrie du réseau de fractures. Depuis les années 2000, les outils d'imagerie de paroi ont une bien meilleure définition et une meilleure résistance à haute température. Leur utilisation s'est bien développée mais pas encore totalement généralisée. Etant donné l'enjeu que constitue la connaissance des réseaux de fractures dans les réservoirs géothermaux, l'acquisition d'images de paroi devrait être maintenant réalisé couramment pour tous les forages de géothermie.



Microfracture pattern compared to core-scale fractures in the borehole of Soultz-sous-Forêts granite, Rhine graben, France

Chrystel Dezayes^{a,b,*}, Thierry Villemain^a, Arnaud Pêcher^c

^aLaboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines, UPRES-A CNRS 5025, Université de Savoie, 73376 Le Bourget du Lac Cedex, France

^b10 rue de Mortillet, 38000 Grenoble, France

^cLaboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines, UPRES-A CNRS 5025, Université Joseph Fourier, Institut Dolomieu, 15 rue M. Gignoux, 38031 Grenoble, France

Received 14 June 1999; accepted 13 January 2000

Abstract

Microfractures appearing in thin section as fluid inclusion trails in quartz crystals were studied in four core samples of Soultz-sous-Forêts granite. Their orientations in four series of three mutually perpendicular thin sections were estimated using a previously described apparent dip method and a new method involving measurements of strike and apparent dips.

Three samples display three microfracture sets and one sample displays two sets. In all samples, one set is nearly vertical and strikes N–S. In two samples, one and two sets are nearly vertical and strike E–W. In two samples, two sets strike NW–SE: one is vertical, the other dips gently to the NE (or SW). Comparing microfracture and mesofracture sets in the same cores shows that (1) the N–S microfracture set is always dominant at both scales and (2) all other microfracture sets have no mesoscopic counterpart. The N–S microfracture sets could have been created during E–W extension of earliest Cenozoic age (Rhine Graben rifting). Differences between the two scales are explained by a σ_1/σ_2 switching which occurred at the crystal scale and generated mutually perpendicular cracks. © 2000 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

As fracture spacing is generally larger than core diameter, fracture sampling in the core is influenced by the orientation of the borehole (Terzaghi, 1965): thus fractures sub-parallel to the core are under-represented because they are unlikely to be intersected. This sampling problem can be corrected by using a weight function of the angle between each fracture and the core axis. Unfortunately this numerical correction introduces other sources of error, especially if the analysed core section is short. An alternative way to analyse the fracture consists of measuring fractures on a larger scale, such as in core samples and then extrapolating the results to other smaller scales. However, the same sampling problem applies to microfractures

observed in a thin section, as fractures sub-parallel to the section will also be under-represented. Correcting this bias by applying a weight function of the angle between a fracture and the core axis or thin section introduces other sources of error because this assumes the fracture network to be homogeneous and that the studied thin section correctly samples the whole volume. To partly remove the bias, we have chosen to study the microfractures in each core sample by using three mutually perpendicular sections.

In this study of the Soultz-sous-Forêts granite (Fig. 1) we have analysed microfractures marked by fluid inclusion planes (FIP) in quartz crystals using the method of Lespinasse and Pêcher (1986). We also developed a new method of finding the orientation of FIP sets from only the strikes of trails. The aim of this paper is to describe this method, present the data, and to compare them with the mesoscopic data of Dezayes et al. (1995).

* Corresponding author.

E-mail address: chrystel.dezayes@univ-savoie.fr (C. Dezayes).

1.2. Mise en place de la fracturation

La fracturation d'un massif rocheux peut être la conséquence de plusieurs phénomènes qu'ils soient naturels, liés à l'histoire tectonique, la décompression lors de la remontée du massif à l'affleurement ou l'altération superficielle, ou induits par des actions anthropiques comme le forage ou l'excavation.

Dans le cas de l'exploitation de la géothermie profonde en milieu fracturé, nous qualifierons de fractures pré-existantes, les fractures en lien avec les phénomènes naturels, et d'induites celles liées à des actions anthropiques sur le massif. Savoir comment se sont mise en place les fractures est important à différents égards. Tout d'abord, cela peut constituer un guide pour l'exploration dans la mesure où l'histoire tectonique d'une région peut donner des indications sur l'état de fracturation d'un massif. D'autre part, cela fournit des informations pour la génération numérique de réseau de fractures (DFN) à des fins de modélisations hydrauliques (prédictions des circulations de fluides), mécaniques (prédictions des microséismes suite à des sollicitations hydrauliques en forage) et thermiques (prédiction de l'évolution des températures au cours de l'exploitation du milieu). De plus, cela peut permettre de retrouver l'état du champ de contrainte passé, qui aurait engendré les fractures et fait glisser les failles, et du champ de contrainte actuel par l'étude des fractures induites.

A Soultz, les fractures pré-existantes dans le granite résultent de l'histoire tectonique de la région depuis sa mise en place au Viséen. Les fractures observées dans les puits à partir des images de paroi acoustiques ou électriques ainsi que sur les carottes sont décrites dans les deux articles ci-après (Dezayes *et al.*, 1996a, 1996b). Elles s'organisent essentiellement autour de deux familles sub-méridiennes conjuguées (Figure 4). Il en va de même pour les fractures identifiées sur les carottes comme des fractures de relaxation qui apparaissent lors de l'extraction des carottes du puits (Dezayes *et al.*, 1996b). Ces fractures sont en fait des fractures latentes qui sont initiées sous un champ de contrainte passé et qui ne s'expriment qu'une fois décompressées. Ces fractures, pré-existantes et de relaxation, semblent en lien avec la distension E-W oligocène qui a permis l'ouverture du Graben du Rhin.

Les fractures induites, identifiées le long du forage par les imageries de paroi, sont principalement des fractures verticales et des fractures en échelon (Dezayes *et al.*, 1996a), ainsi que des break-out (Valley *et al.*, 2006). L'analyse de ces fractures induites mettent en évidence une variation de la direction de contrainte horizontale maximale N125°E dans le forage EPS1, N160°E dans la partie supérieure du forage GPK1 jusqu'à 500m de profondeur et N180°E au-delà, N170°E dans le forage GPK2 (Valley, 2007). Ces variations de contraintes sont probablement dues à la présence de grandes structures dans le massif qui perturbent le champ de contraintes (Dardji *et al.*, 1994).

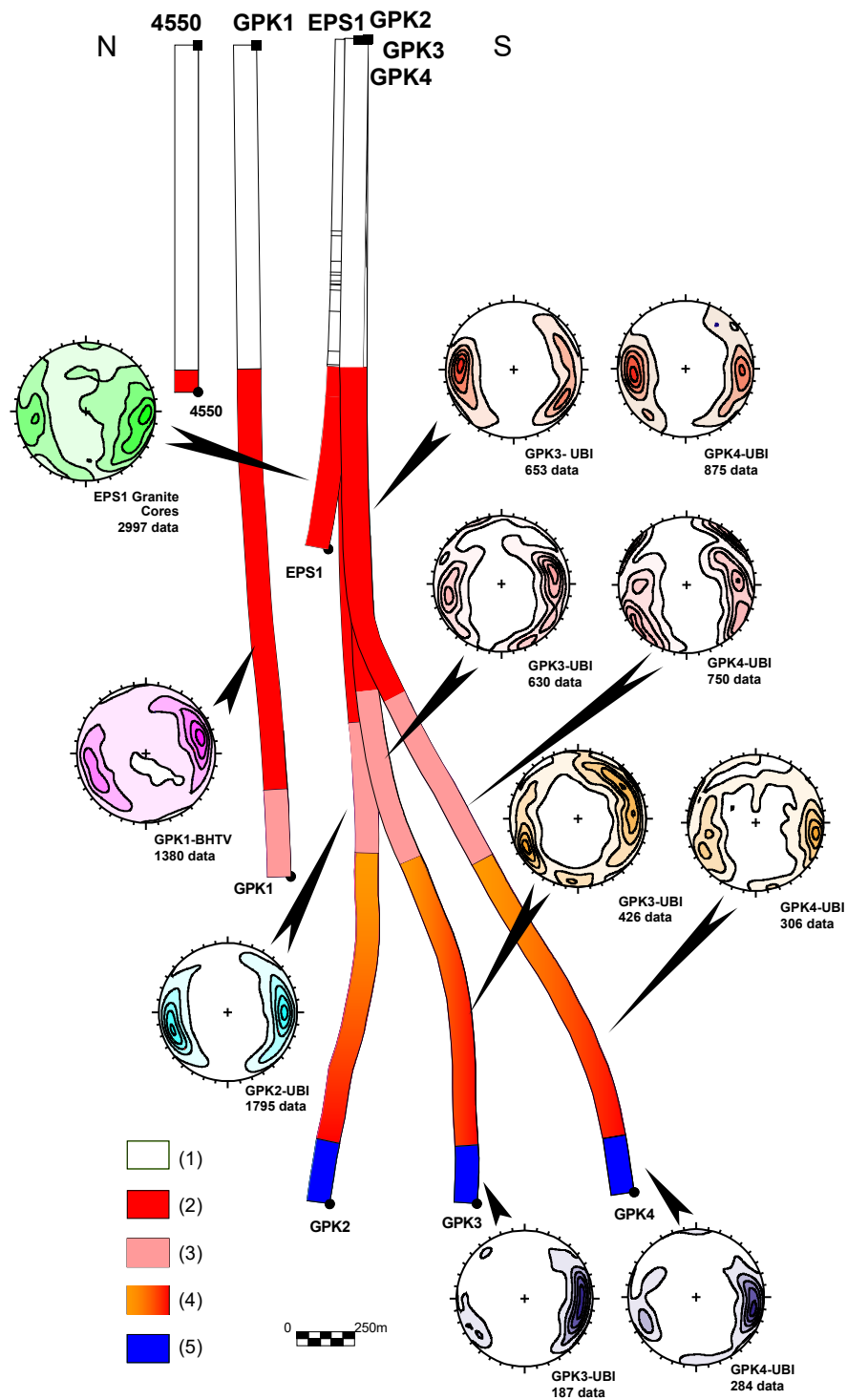


Figure 4 - Orientation des fractures dans le granite à partir de l'analyse des carottes et des images de paroi des puits de Soutz. Pour les puits GPK3 et GPK4, les données sont regroupées par faciès pétrographique majeur (Hooijkaas et al., 2006). La profondeur le long des puits indique la limite supérieure et inférieure des sections pétrographiques (altitude à partir du niveau marin de l'IGN). Diagramme de densité en projection de Schmidt, hémisphère inférieure, courbes à 10 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 % de la fréquence maximale. Géologie : (1) couverture sédimentaire, (2) granite standard, (3) granite standard avec une altération filonienne intensive, (4) granite riche en amphibole et en biotite évoluant progressivement vers un granite standard. (5) granite à deux micas et granite riche en biotite (Dezayes et al., 2010).

FRACTURATION HÉRITÉE ET INDUITE CARACTÉRISÉE À PARTIR D'IMAGES ACOUSTIQUES ET ÉLECTRIQUES DE PAROIS DE FORAGES

INHERITED AND INDUCED FRACTURES CHARACTERIZED FROM ACOUSTIC AND ELECTRIC BOREHOLE IMAGES

Chrystel DEZAYES, Albert GENTER et Thierry VILLEMIN



DEZAYES, C., GENTER, A. & VILLEMIN, T. (1996). – Fracturation héritée et induite caractérisée à partir d'images acoustiques et électriques de parois de forages. [*Inherited and induced fractures characterized from acoustic and electric borehole images*]. – *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf Aquitaine*, 20, 1, 197-212, 14 fig., Pau, June 28, 1996. – ISSN : 0396-2687, CODEN : BCREDP.

In the framework of a European Geothermal Project, three boreholes were drilled at Soultz-sous-Forêts, Rhinegraben, which reached the hot and fractured granitic basement. Fresh water will be injected into one borehole, and recovered hot from the other. To design this reservoir, a knowledge of both the paleo-fracture pattern in the granite and the orientation of the present-day stress field is required.

Fracture analysis was carried out on borehole images coming from different boreholes. Two types of logging tools were used to produce these images : acoustic tools (BHTV, UBI) and electric tools (FMI, FMS). Fractures observed have two origins : pre-existing fractures and induced fractures.

Pre-existing fractures showed a symmetrical pattern with a principally N-S direction. These fractures have been created during the tectonic history of the massif since the Visean. This fracture pattern appears to be related to the graben opening which took place during the E-W extensional Oligocene regime. The strike-slip fractures created from the other tectonic regimes (strike-slip compressive stress state) seem under-sampled by the borehole. However, another fracture set (N50°E) exists but is visible on the acoustic image only. The N-S fracture set is in the present-day horizontal stress direction and locally contains natural fluid. Electric tools are very sensitive to the occurrence of fluid. Fractures with offset are easily detected by acoustic tools.

The analysis of induced fractures indicates directly the present-day stress field. Their direction is parallel to the direction of the maximum stress in the plane perpendicular to the borehole axis. This direction is N125°E in the EPS1 well and N160°E in the upper part of the GPK1 well, located 500 m apart, but N180°E in the lower part of the GPK1 well and N170°E in GPK2 well. These variations of the direction of induced fractures are due to a variation of the present-day stress field at the site scale and at the borehole scale. The results of other *in situ* present-day stress measurements confirm this variation of the stress field. This stress perturbation could be due to the occurrence of major faults in the rock volume. The boreholes have intersected a fault zone, which may be the cause of stress deviation.

Chrystel Dezayes, Thierry Villemin, Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines, UPRES-A CNRS 5025, Université de Savoie, F.73376 La Bourgot du Lac ; Albert Genter, BRGM, D.R., G.I.G., BP 6009, F.45060 Orléans cedex 2.- May 20, 1996.

Key words : Acoustic logging, Electric logging, Fractures, Granite, Geothermal reservoirs, Hot dry rocks, Natural fractures, Induced fractures, Bas-Rhin, Soultz-sous-Forêts.

0396-2687/96/0020-0197 \$ 3.2
© 1996 elf aquitaine production, F.64018 Pau

[Dezayes et al. \(1996a\) Fracturation héritée et induite caractérisée à partir d'images électriques et acoustiques de parois de forages: l'exemple de Soultz-sous-Forêts \(Alsace, France\)](#)

Origine et signification des fractures de relaxation dans les carottes de granite du forage EPS1 (Soultz-sous-Forêts, Graben du Rhin)

Chrystel Dezayes, Thierry Villemin, Albert Genter et Jacques Angelier

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 323, série II a,
p. 333 à 340,
1996

Ch. D. et Th. V. : Laboratoire
de Géodynamique
des Chaînes Alpines
et UPRES-A CNRS 5025,
Université de Savoie,
73376 Le Bourget-du-Lac,
France ;

A. G. : BRGM, DR, GIG, BP n° 6009,
45060 Orléans CEDEX 2, France ;

J. A. : Département
de Géotectonique et URA 1759,
Université Pierre-et-Marie-Curie,
Boîte 129, 75252 Paris CEDEX 5,
France.

Résumé La fracturation du site a été analysée sur des carottes d'un forage profond dans le socle granitique chaud et fracturé du fossé rhénan à Soultz-sous-Forêts (projet européen de géothermie profonde). Deux catégories de fractures, l'une antérieure, l'autre contemporaine ou postérieure au carottage, ont été mises en évidence. Les fractures préexistantes montrent une organisation conjuguée en failles normales liée à l'ouverture oligocène du fossé. Les fractures postérieures apparaissent par relaxation des carottes ; nous démontrons qu'elles reflètent une fracturation latente liée à l'extension oligocène. De telles fractures se formant par relaxation sont donc dépendantes, par leur orientation et par leurs mécanismes, de l'histoire tectonique du massif rocheux et pas seulement des phénomènes actuels (contraintes *in situ* et forage).

Mots-clés : Graben du Rhin, Forages, Carottes, Fractures, Granite, Contraintes, Endommagement.

Abstract **Origin and significance of relaxation fractures
in EPS1 granite core sections (Soultz-sous-Forêts, Rhinegraben)**

Detailed analysis of fracture patterns was carried out in the granite core sections of a deep borehole, which reached the hot and fractured granitic basement of the Rhinegraben at Soultz-sous-Forêts (European Geothermal Project). Two main types of fractures were identified, respectively older than and subsequent to drilling. Most pre-existing fractures show a conjugate, normal fault type pattern which reflects the conditions of the Oligocene graben opening. The other types of fractures are revealed by core relaxation. We demonstrate that they correspond to a latent fracturing due to the same Oligocene extension. Such development of relaxation fractures during core extraction may thus be strongly influenced by the tectonic history of the rock massif, and not by the present-day stress and drilling conditions exclusively.

Keywords: Rhinegraben, Wells, Drill-cores, Fractures, Granite, Stress, Damaging.

**Abridged
English
Version** **INTRODUCTION**

WITHIN the framework of the European Hot Dry Rock (HDR) program, two deep boreholes were drilled in the upper Rhinegraben at Soultz-sous-Forêts (fig. 1) (Garnish *et al.*, 1994).

Based on observations on the cores, Genter and Traineau (1991) created a data base of 3,700 oriented fractures. They distinguished two categories of fractures which differ in origin: faults or veins, and thin cracks. The first type of fractures, formed during the tectonic

Note

*présentée par
Jean Dercourt.*

*remise le 4 juillet 1995,
acceptée après révision
le 29 janvier 1996.*

Les fluides présents dans les massifs rocheux profonds envahissent les réseaux de fractures, d'autant plus que la matrice rocheuse est peu perméable, ce qui est le cas du granite. Ces fluides vont interagir chimiquement avec la roche pour dissoudre des minéraux à certains endroits et en cristalliser à d'autres suivant les conditions de pression et température du milieu. Cette action de dissolution-recristallisation ouvre et ferme les fractures, modifiant sans cesse les chemins de circulation des fluides durant l'histoire géologique du massif.

Dans le Fossé Rhénan, ces fluides ont façonné le socle granitique tout au long de son histoire jusqu'à la situation actuelle où les fluides profonds et chauds sont exploités pour la géothermie. L'étude des minéralisations déposées par ces fluides permet de mettre en évidence l'origine et les différentes phases de circulation en lien avec l'histoire tectonique. Au niveau de l'interface entre le socle et la couverture, où les circulations ont pu être particulièrement actives lors du remplissage du fossé, nous avons pu mettre en évidence quatre phases de circulation, lors de la mise en place du graben au Tertiaire, décrites dans la publication ci-après (Dezayes *et al.*, 2019b). Début Eocène, la réactivation des anciennes structures hercyniennes associée à la tectonique pré-rift et l'introduction de fluides météoritiques dans le milieu engendrent des textures de cataclase et la précipitation d'illite et de microquartz le long des fractures. L'introduction de ces fluides froids dans un système où existent déjà des fluides chauds engendre une circulation convective et le dépôt de dolomie et de barytine dans ces fractures hercyniennes réactivées. Avant la remontée des épaules du fossé (Massif des Vosges et de la Forêt Noire), les fractures subméridiennes s'ouvrent en tension et sont caractérisées par des textures de cataclase et la précipitation d'illite et de barytine (Figure 5). Les circulations convectives se poursuivent et se caractérisent par des remplissages de calcite et de barytine. Cette convection se poursuit actuellement le long de la bordure ouest du fossé, engendrant les anomalies thermiques locales de Sélestat, Strasbourg, Soultz, Landau, etc... (cf. §3).

Malgré la présence forte de fractures sub-méridiennes qui peuvent apparaître comme la famille dominante dans le massif granitique de Soultz en lien avec l'ouverture du Fossé Rhénan, il s'avère que la tectonique varisque antérieure a joué un rôle majeur dans la mise en place du réseau de fractures. Ces fractures ont ensuite joué sous l'effet des contraintes successives en fonction de leur orientation. Elles ont donc subi plusieurs phases de cisaillement, plusieurs phases de dissolution et de cristallisation pouvant conduire à une certaine porosité.

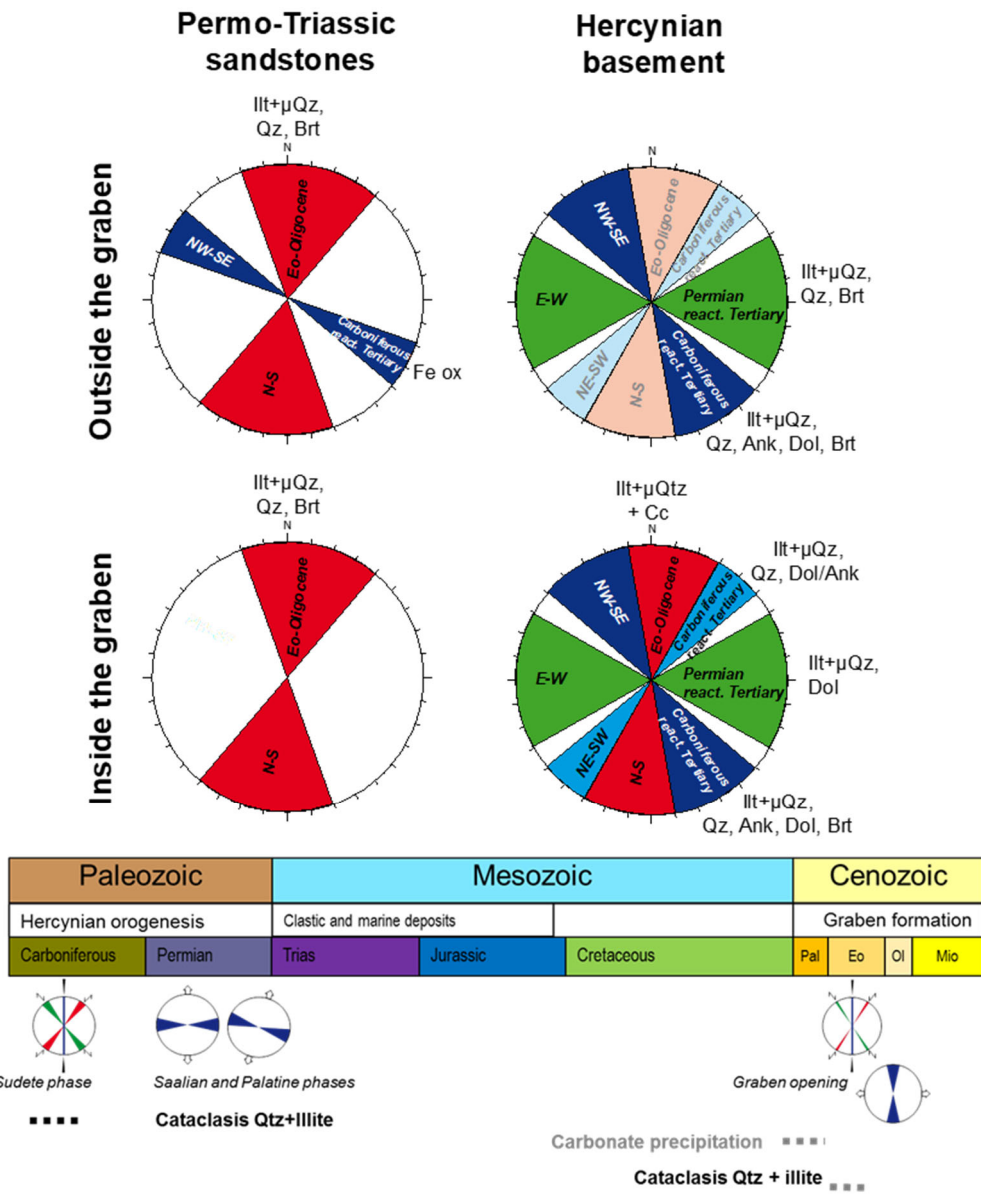


Figure 5 – Synthèse des principales orientations de fractures et des minéralisations associées dans le socle granitique et les grès permo-triasiques à l'intérieur du Fossé Rhénan (forages) et sur ses épaules (affleurements) (Dezayes et al., 2019b).

Research Article

Reconstructing Paleofluid Circulation at the Hercynian Basement/Mesozoic Sedimentary Cover Interface in the Upper Rhine Graben

Chrystel Dezayes  and Catherine Lerouge 

BRGM, 3, avenue Claude Guillemin, BP36009, 45060 Orléans Cedex 2, France

Correspondence should be addressed to Chrystel Dezayes; c.dezayes@brgm.fr

Received 24 April 2018; Revised 10 October 2018; Accepted 26 November 2018; Published 6 March 2019

Academic Editor: Domenico Montanari

Copyright © 2019 Chrystel Dezayes and Catherine Lerouge. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this paper, we focus on paleocirculation at the Hercynian basement/sedimentary cover interface in the tectonic environment of the Upper Rhine graben. The goal is to increase our understanding of the behavior of the fracture-fault network and the origin of the hydrothermal fluids. We studied orientations, mineral fillings, and fluid origins of fractures that crosscut the Hercynian granitic basement and the Permo-Triassic formations in relation to the major tectonic events. Because the Mesozoic formations and the Hercynian basement on the graben flanks and inside the graben do not have the same evolution after uplift, our study includes 20 outcrops on both graben flanks and cores of the Soultz-sous-Forêts geothermal wells located inside the graben. The Hercynian granitic basement and Permo-Triassic formations were affected by several brittle phases associated with fluid circulation pulses related to graben formation during the Tertiary. We distinguished at least four stages: (1) reactivation of Hercynian structures associated with pre-rift tectonics during the early Eocene and descending meteoric waters, characterized by shearing/cataclasis textures and precipitation of illite and microquartz; (2) initiation of convective circulation of deep hot brines mixed with descending meteoric waters at the Hercynian basement/sedimentary cover interface during this first stage of Eocene rifting, characterized by dolomite and barite fillings in reactivated Hercynian fractures; (3) N-S tension fractures associated with rift tectonics just prior to uplift of the graben shoulders during Oligocene extension and descending meteoric waters, characterized by cataclastic textures and precipitation of quartz, illite, hematite, and barite; and (4) current convective circulation of deep hot brines mixed with descending meteoric waters at the Hercynian basement/sedimentary cover interface, characterized by calcite and barite fillings within the graben. This convective circulation is today present in deep geothermal wells in the western part of the Rhine graben.

1. Introduction

In studying geothermal systems, knowledge of fluid pathways at depth is critical for improving exploration for future resources while reducing geological risk.

Fluid migration through the crust depends to a great extent on the permeability and porosity of the rocks being crosscut [1]. These two parameters represent the rock's capacity to transmit fluid. Permeability and porosity depend on the initial rock type (sediments, magmatic rocks, and metamorphic rocks) [2] and geological processes that the rock has undergone during its history. These include

fluid/rock interactions (low/high fluid/rock ratios), deformation (ductile/brittle), and pressure/temperature changes (e.g., diagenesis, metamorphism, hydrothermal alteration, and weathering). In tectonically and/or thermally stable environments, permeability may reduce drastically at depth and fluid/rock interactions are likewise reduced. In more active environments, geological evidence from several studies shows that hydrological systems operate at different scales and at all depths of the continental crust [1].

Hydrogeologists and geologists want to understand the nature, origin, and role of fluids in such fundamental geological processes as hydrothermal systems [3], deep geothermal

[Dezayes & Lerouge \(2019\) Reconstructing Paleofluid Circulation at the Hercynian Basement/Mesozoic Sedimentary Cover Interface in the Upper Rhine Graben](#)

2. REPRESENTATION DES RESERVOIRS GEOTHERMAUX PROFONDS FRACTURES A DIFFERENTES ECHELLES

La caractérisation du réseau de fractures constitue un élément essentiel pour la modélisation réservoir, et consiste d'une part en un modèle statique du milieu géologique, et d'autre part, en la simulation de son fonctionnement qu'il soit hydraulique, thermique, mécanique voire chimique.

Pour cela la représentation du réseau de fractures en trois dimensions (3D) est une étape indispensable. Cette modélisation géométrique permet de mettre en évidence la complexité de l'agencement des fractures, de visualiser son organisation et de constituer la base aux modélisations dynamiques telles que les simulations mécaniques, hydrauliques et hydrothermiques.

Lors de mes travaux, cette modélisation géologique s'est faite à trois échelles : l'échelle du puits et un peu au-delà (Gentier *et al.*, 2014, 2005; Massart *et al.*, 2010; Sausse *et al.*, 2010), à l'échelle locale, c'est-à-dire sur une surface de quelques centaines de mètres de côté (Baillieux *et al.*, 2011; Dezayes *et al.*, 2008a, 2011), et l'échelle régionale, c'est-à-dire sur une surface de quelques dizaines de kilomètres de côté (GeORG project). Ces deux dernières échelles seront traitées ensemble car elles sont fondées sur la même démarche et le même type de données.

2.1. Représentation du réseau de fractures à l'échelle du réservoir

A Soultz, les zones de failles les plus importantes identifiées au niveau du puits (Dezayes *et al.*, 2010) ont été représentées en 3D par une approche déterministe en utilisant une méthode Discret Fracture Network (DFN) présentée dans l'article ci-dessous (Sausse *et al.*, 2010). D'autres données associées ont été incluses dans le modèle comme la localisation de la microsismicité induite par les injections hydrauliques dans les puits lors des stimulations, ainsi que des éléments issues de la sismique verticale de puits (Place *et al.*, 2010). La confrontation de ces données possédant différents niveaux de résolution n'est pas simple et oblige à faire des approximations et des simplifications afin de représenter les fractures par des plans. Ainsi, la variabilité possible de l'orientation des fractures n'est pas prise en compte, ni leur forme. Cependant, cette modélisation a permis d'associer les différentes données et de hiérarchiser les zones de failles en fonction des arguments apportés (Figure 6).

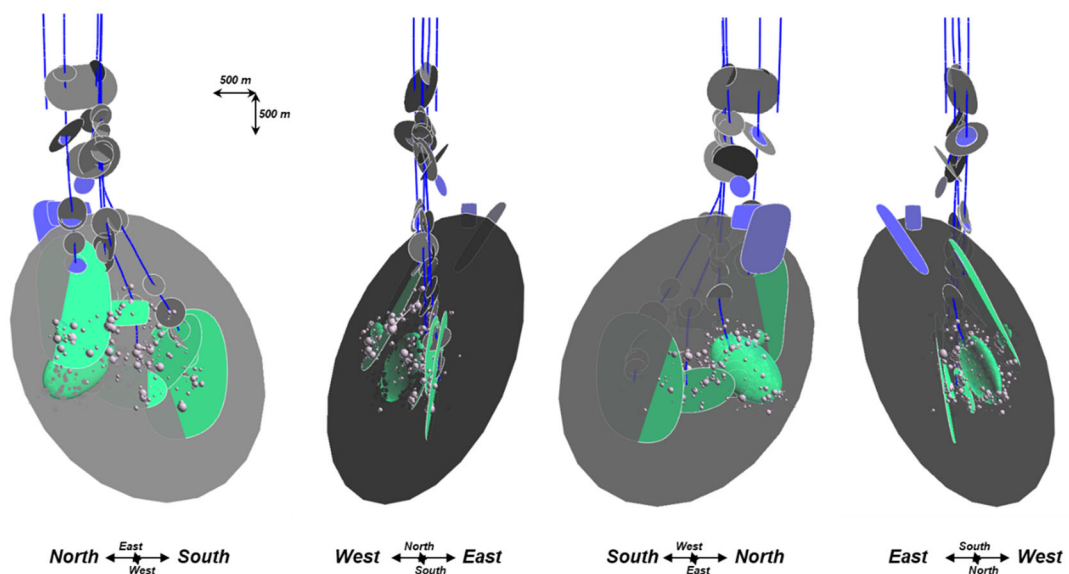


Figure 6 – Modèle de l'ensemble des zones de failles recoupant les puits de Soultz (Sausse *et al.*, 2010).

Ce modèle a permis de corrélérer certaines fractures aux microséismes, ce qui supposerait que ces fractures se sont ouvertes aux passages du fluide lors des stimulations hydrauliques. Il s'agit d'un résultat important qui sera pris en compte lors des analyses hydro-mécaniques du réservoir (Gentier *et al.*, 2014, 2010; Rachez *et al.*, 2010). Cependant, d'autres fractures constituent des chemins de circulation sans qu'il y ait de déclenchement de microséismes si ces fractures sont suffisamment perméables. Les fractures corrélées aux microséismes ne constituent donc qu'un sous-ensemble des chemins de circulation.

Le modèle au puits a également permis de déterminer l'orientation moyenne de certaines zones de faille dont la plus importante d'entre elles observée dans GPK3 à environ 4770 m et dans GPK2 à environ 3900 m, mais avec des caractéristiques bien différentes et en particulier avec un développement latéral beaucoup moins important (épaisseur, altération). D'après le modèle, cette zone de failles n'est pas recoupée par GPK4 et se situerait à une centaine de mètres en dessous de ce puits. L'orientation moyenne de toutes les zones de failles montrent une direction principale NW-SE, différentes de la direction moyenne des mésofractures mesurées dans le granite. La direction majoritairement N-S observée lors des analyses de la mésofracturation dans le granite, et liée à l'ouverture du Fossé Rhénan, ne serait pas celle des grandes zones de faille qui structurent le massif granitique (Dezayes *et al.*, 2010).

Cette approche est très statique et aussi fortement « expert driven », mais permet toutefois de confronter les experts de différentes spécialités autour d'un même objet visuel afin d'arriver à un résultat qui n'est probablement pas unique mais qui servira de base à des modélisations physiques / dynamiques comme par exemple des modèles de simulation hydro-mécanique permettant de comprendre les phénomènes physiques à l'origine des comportements du massif lors des tests de stimulations réalisés dans les puits (Gentier *et al.*, 2005).



Internal geophysics

3D model of fracture zones at Soultz-sous-Forêts based on geological data, image logs, induced microseismicity and vertical seismic profiles

Modèle 3D des zones de fractures dans le réservoir profond de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin, France) : données géologiques, imageries de puits, microsismicité induite et résultats VSP

Judith Sausse^{a,*}, Chrystel Dezayes^b, Louis Dorbath^c, Albert Genter^d, Joachim Place^c

^a Département géosciences, UMR CNRS 7566 G2R, Nancy université, BP 70239, 54506 Vandœuvre les Nancy, France

^b Département géothermie, BRGM, 3, avenue C- Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans cedex 2, France

^c EOST, 5, rue René-Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France

^d EEG exploitation minière de la chaleur, route de Soultz, BP 38, 67250 Kutzenhausen, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 October 2008

Accepted after revision 19 January 2010

Available online 27 March 2010

Written on invitation of the Editorial Board

Keywords:

Deterministic fractures

Fault

3D model

Soultz geothermal reservoir

Well logs

Induced microseismicity

Vertical Seismic Profile

France

Mots clés :

Fractures déterministes

Modèle 3D

Réservoir géothermique de Soultz

Imagerie de puits

Microsismicité induite

Vertical Seismic Profile

France

ABSTRACT

This study presents a new deterministic 3D model of the fracture zones observed in the granitic reservoir of the Soultz European geothermal project. The major fracture zones encountered around 6 wells (4550, EPS1, GPK1, GPK2, GPK3 and GPK4) consist in 53 main structures that are located and characterized in terms of size and orientation: 39 fracture zones, 8 microseismic structures and 6 structures derived from vertical seismic profiles are represented in the 3D model using Discrete Fracture Network tools of the gOcad modelling platform (ParadigmTM, Earth DecisionTM). This work illustrates the complexity of 3D fracture zone correlation and interpretation in crystalline rock masses characterized at meter scale (borehole) and at the reservoir scale (kilometer) thanks to geophysical imaging techniques.

© 2010 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

R É S U M É

Cette étude présente un nouveau modèle déterministe 3D des zones de fractures observées dans le réservoir granitique de Soultz-sous-Forêts. Les principales zones de fractures rencontrées par les 6 puits étudiés (4550, EPS1, GPK1, GPK2, GPK3 et GPK4) sont au nombre de 53 structures localisées et caractérisées en termes de taille et d'orientation : 39 zones de fractures identifiées sur les diagraphies, 8 structures supposées d'après la microsismicité induite par les tests hydrauliques et 6 structures interprétées à partir de la sismique de puits VSP sont représentées par une approche déterministe et utilisant une approche Discrete Fracture Network DFN de la plate-forme de modélisation gOcad (ParadigmTM, Earth DecisionTM). Ce travail illustre la complexité de l'interprétation 3D des

* Corresponding author.

E-mail address: judith.sausse@g2r.uhp-nancy.fr (J. Sausse).

2.2. Représentation du réseau de fractures à l'échelle locale et régionale

A des fins d'exploration et d'estimation de la ressource, la représentation des structures en 3 dimensions à des échelles plus locales (environ 30x30 km) et régionales (environ 100x100 km) est indispensable pour comprendre certaines relations géométriques, estimer des volumes, ou constituer une base pour des modèles dynamiques de type hydromécanique et hydrothermique.

A l'échelle locale et pour estimer la ressource au niveau des anomalies thermiques à l'ouest de Strasbourg dans le Fossé Rhénan, j'ai pu mettre en place, pour la première fois, une méthodologie de construction de modèle géologique 3D (Dezayes *et al.*, 2008a). L'objectif est d'accéder au volume de la formation triasique du Buntsandstein afin d'en calculer la valeur de la chaleur en place à partir de la relation suivante (Muffler *et al.*, 1978) :

$$Q = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot (T_i - T_f) \text{ en joule} \quad [1]$$

avec ρ la densité de la roche (kg/m^3), C_p sa capacité calorifique (J/kg.K), V le volume de roche considéré (m^3), T_i la température initiale de l'aquifère ($^\circ\text{C}$) et T_f sa température finale une fois la chaleur extraite ($^\circ\text{C}$).

La construction de ce modèle se fonde sur l'interprétation de lignes sismiques anciennes, datées des années 70 et 80, et retraitées avec des algorithmes modernes permettant une meilleure image des structures profondes. L'acquisition de ces lignes sismiques avait été faite dans le cadre de grands programmes de prospection pétrolière des différents bassins français par des compagnies privées dont les données sont maintenant publiques. Cependant, l'objectif étant l'exploitation des hydrocarbures, les paramètres d'acquisition avaient été optimisés pour la partie sédimentaire du bassin et donc ne matérialisent pas ou mal le fond du bassin et le socle sous-jacent.

Les lignes sismiques, très nombreuses au niveau du Fossé Rhénan, ont été choisies de manière à former un quadrillage dense pour avoir une image la plus complète en 3 dimensions. Une fois retraitées, ces lignes ont été interprétées en terme d'interface lithologique et de failles décalant ces interfaces. Le tracé des failles a été introduit dans le logiciel de modélisation géologique 3D Geomodelleur, puis les interfaces lithologiques, qui ont été ajustées afin de respecter une cohérence en 3 dimensions. N'ayant pas une couverture de données complète et suffisamment bien définie de la zone, différentes hypothèses ont été formulées quant aux interpolations des failles détectées sur les profils sismiques vers la représentation en 3D et à la structure du Buntsandstein qui en découle. Ainsi différentes valeurs de volume et de chaleur en place ont été calculés mettant en évidence l'incertitude sur ces valeurs et l'importance de caractériser le plus précisément possible de réseau de failles (Figure 7; Dezayes *et al.*, 2008).

Cette méthodologie a ensuite été appliquée sur tout le Fossé Rhénan dans le cadre du projet INTERREG IV GeORG afin de réaliser un modèle 3D géologique complet du fossé dans le but d'identifier les potentiels de stockage souterrain de CO_2 et d'exploitation de la géothermie (GEORG, 2013). Le modèle 3D est mis à disposition des pouvoirs publics et des citoyens via une interface cartographique sur le web (<https://maps.geopotenziale.eu>) permettant à chacun de consulter ce qu'il est susceptible de trouver sous ses pieds. Comme pour le test réalisé sur la zone Strasbourg-Obernai, le modèle a servi de base au calcul de la chaleur en place des différents aquifères, potentiels réservoirs géothermaux. Il a également permis de mettre en évidence les zones favorables à la séquestration de CO_2 par l'identification de formations réservoirs sous-jacents aux formations de couverture (caprock).

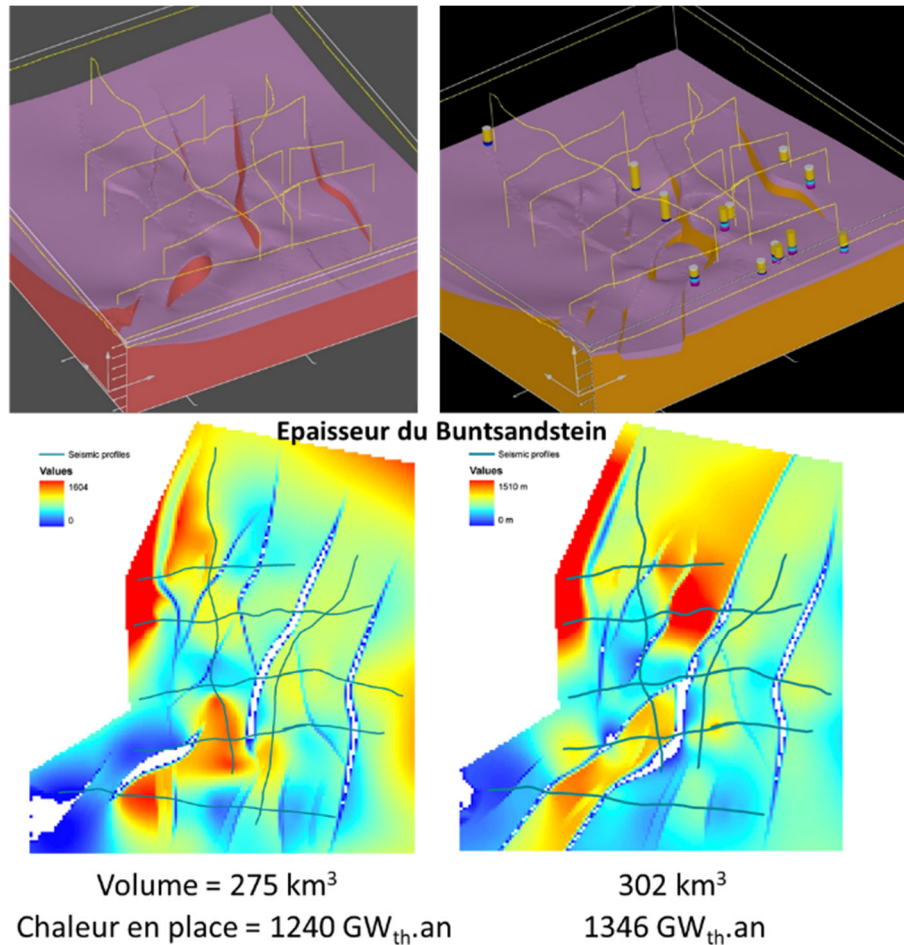


Figure 7 – Deux hypothèses de corrélation de failles influançant l'épaisseur des grès du Buntsandstein dans la région d'Obernai et par là même, la quantité de chaleur en place (Dezayes et al., 2008b).

Dans un second temps, ce modèle, et plus particulièrement le réseau de failles, a servi à la construction d'un modèle géométrique simplifié sur la base de l'organisation d'une zone de cisaillement de type Riedel (Ahlgren, 2001; Katz et al., 2004). Ce découpage en blocs ne prend cependant pas en compte la sinuosité des failles ni leur inclinaison. Elles sont alors considérées comme rectilignes et verticales. A partir de cette géométrie simplifiée, des modélisations mécaniques et hydrauliques ont été réalisées dans le but d'identifier des zones préférentielles de remontées des fluides profonds et chauds dans le fossé (Armandine et al., 2019). Les simulations mécaniques de l'état de contrainte actuel sur la zone ont permis de mettre en évidence les secteurs en dilatance pouvant permettre la circulation des fluides. Ces résultats ont été intégrés dans un modèle hydraulique qui a permis de mettre en évidence les circulations profondes et les zones de remontées des fluides. Cependant, le modèle géométrique de départ est bien trop simplifié pour refléter la réalité. L'objectif était d'identifier des zones potentielles à explorer plus en détail pour l'exploitation de la géothermie profonde (voir § 3).

Ce travail a surtout permis de mettre en place une méthodologie de modélisation, mais les résultats doivent être nuancés en l'absence de validation du modèle. Il s'agit maintenant de repartir d'un réseau de failles plus réaliste, prenant en compte leur sinuosité et leur inclinaison en profondeur qui sont des éléments influant le plus les simulations hydrauliques et par conséquent les modèles thermiques.

GEOHERMAL POTENTIAL ASSESSMENT OF CLASTIC TRIASSIC RESERVOIRS (UPPER RHINE GRABEN, FRANCE)

C. Dezayes, A. Genter, I. Thinon, G. Courrioux, B. Tourlière

BRGM, French Geological Survey
BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France
e-mail: c.dezayes@brgm.fr

ABSTRACT

To develop the sustainable energy in France, a new geothermal exploration project has been launched in the Upper Rhine Graben for heat or electricity production. This resource is located in clastic formation of the lower Triassic unit, namely the Buntsandstein.

The goal of this study is to make a first assessment of this sedimentary reservoir at two different scales. In a first step, we used public available data (map, borehole data...) to assess the geothermal potential of the Buntsandstein at the Upper Rhine Graben scale in order to delineate the most favourable areas for future exploration and exploitation of the geothermal resource. It appears that the northern part of the Rhine graben constitutes a more favourable area than its southern part. The top of the reservoir located at around 2000m depth is characterized by a temperature of about 150°C and a sandstone thickness around 600m. Based on Muffler & Cataldi works (1978), the computation of the heat in place gives a geothermal potential between 15 and 30GJ/m².

In a second step, a 30km x 35km area located between Strasbourg and Obernai in France has been investigated. Based on a detailed geological study combining data derived from 13 previous oil boreholes and 143km length of seismic profiles, the main sedimentary interfaces including geological layers and faults have been interpreted between the outcropping Quaternary layers and the deeper parts made of Permo-Triassic formations. From that interpretation, 3D geological models have been yielded based on different hypotheses. These models, constructed with the Geomodeller software developed by BRGM, allow calculating the volume of modelled sedimentary formations. According to the modelling results, different reservoir volumes have been computed which impacts the estimation of the overall geothermal potential. Temperature conditions derived from BHT (Bottom Hole Temperature) data in boreholes reaching the Buntsandstein sandstones, show a high average geothermal gradient (between 50°C/km and 58°C/km), which tends to indicate a significant geothermal potential. In the investigated area, the volume of the Buntsandstein reservoir is about 300km³ and the exploitable heat quantity is around 350GW.year ± 5%.

INTRODUCTION

In France, the geothermal heating production is mainly concentrated within the Paris Basin, where about 30 geothermal doublets have been exploiting the Dogger limestone reservoir since the 80's and produce about 4000 TJ/year with an installed capacity of about 240MWt (Laplaige et al., 2005). The development of renewable energy necessitates exploring new or poorly well-known deeper sedimentary geothermal reservoirs, located in other promising areas. Thus, in order to promote renewable energy in France, Ademe (French Agency for Environment and Energy Management) and BRGM (French Geological Survey) launched a new research project for a geothermal appraisal of the low to medium temperature resources embedded in clastic reservoirs mainly focused on sedimentary basins (Paris Basin, Rhine Graben, Limagne Graben; Genter et al., 2005). In this framework, we conducted a comprehensive study about the deep sedimentary geothermal potential of the Rhine graben for heat and/or electricity production. The geothermal resource belongs to the silico-clastic formations embedded within the thicker Triassic sediments made of argillaceous sandstones, where temperatures are often higher than 100°C based on previous deep geothermal borehole data (Cronenbourg, Rittershoffen, Soultz; Munck et al., 1979).

The goal of this study is to make a first assessment of this reservoir at two different scales. In a first step, we used public available data (map, borehole data...) to assess the geothermal potential of the Buntsandstein at the Rhine Graben scale in order to delineate the most favourable areas for exploration and exploitation of the geothermal resource. In a second step, in order to assess a whole methodology for estimating the geothermal potential of the silico-clastic formations of the Rhine Graben, we studied the Buntsandstein reservoir of a limited area near Strasbourg based on borehole data and reflexion seismic profiles.

GEOLOGICAL AND GEOHERMAL SETTING OF THE RHINE GRABEN

The Rhine Graben is a Cenozoic graben belonging to the west European rift system (Ziegler, 1990), which is very well-known because of numerous studies for

Dans un autre contexte, pour l'estimation du potentiel de l'île de Petite Terre à Mayotte, le système volcanique a été modélisé à partir de mesures structurales en surface et d'acquisitions électro-magnétiques pour imager les structures en profondeur. Ce modèle géologique 3D ensuite maillé a servi de base à un modèle hydrothermique basé sur un modèle conceptuel de circulation des fluides à l'échelle de l'île. L'étude de sensibilité des différents paramètres impliqués dans les simulations a permis de mettre en évidence les zones de remontée des fluides chauds, donc les plus favorables à l'implantation de futurs sondages d'exploration (Dezayes *et al.*, 2022b).

La réalisation d'un modèle géologique, intégrant tout particulièrement la fracturation, est donc une étape essentielle dans l'élaboration d'un projet de géothermie depuis l'exploration de la ressource jusqu'à son exploitation. Le modèle géologique permet en effet d'identifier et de quantifier la ressource comme nous l'avons vu, mais également d'obtenir un log lithologique prévisionnel des futurs puits permettant d'établir la meilleure trajectoire pour optimiser au maximum l'exploitation de la ressource.

Le modèle géologique constitue cependant une vision unique du sous-sol provenant d'une interprétation de la ou des personnes qui ont intégré les données et émis des arguments et des hypothèses envers l'une ou l'autre géométrie. Pour le moment, et principalement à cause du temps important passé à construire ces modèles, il n'est que très rarement produit plusieurs versions correspondantes aux diverses hypothèses pouvant être émises. Le modèle constituant le meilleur consensus entre les différents interprétateurs (géologues, géophysiciens, géochimistes, hydrogéologues,...) est en général conservé. Or, nous avons pu voir dans le cas du modèle de Strasbourg-Obernai (Dezayes *et al.*, 2008a) que l'interprétation différente d'une faille engendre une différence dans le calcul de la ressource d'environ 10%. Il est maintenant indispensable de déterminer les incertitudes liées à ce type de modèle, et donc les calculs qui en découlent, et de pouvoir représenter ces incertitudes pour les rendre accessibles et compréhensibles aux pouvoirs publics, industriels et citoyens.

3. CIRCULATION DES FLUIDES DANS LES MILIEUX GEOTHERMAUX PROFONDS FRACTURES

L'exploitation de la géothermie profonde en milieux faillés et fracturés de type I et II (Figure 1) requière une connaissance approfondie des circulations des fluides afin de déterminer où le fluide chaud a la plus forte probabilité d'être présent et en quantité suffisante pour être exploité.

Toutes les fractures ne sont cependant pas le siège de circulation des fluides. Lors de l'observation et de la qualification des fractures, que ce soit en affleurements, sur carottes de forages ou sur images de paroi, deux types de fractures sont observées (Figure 8) :

- les fractures ouvertes qui présentent soit une ouverture des épontes, soit une porosité au niveau du remplissage minéralisé de la fracture ou au niveau de l'altération de ses épontes (Figure 9) ;
- les fractures fermées dont les épontes ne se sont pas déplacées ou qu'elles présentent un remplissage totalement minéralisé.

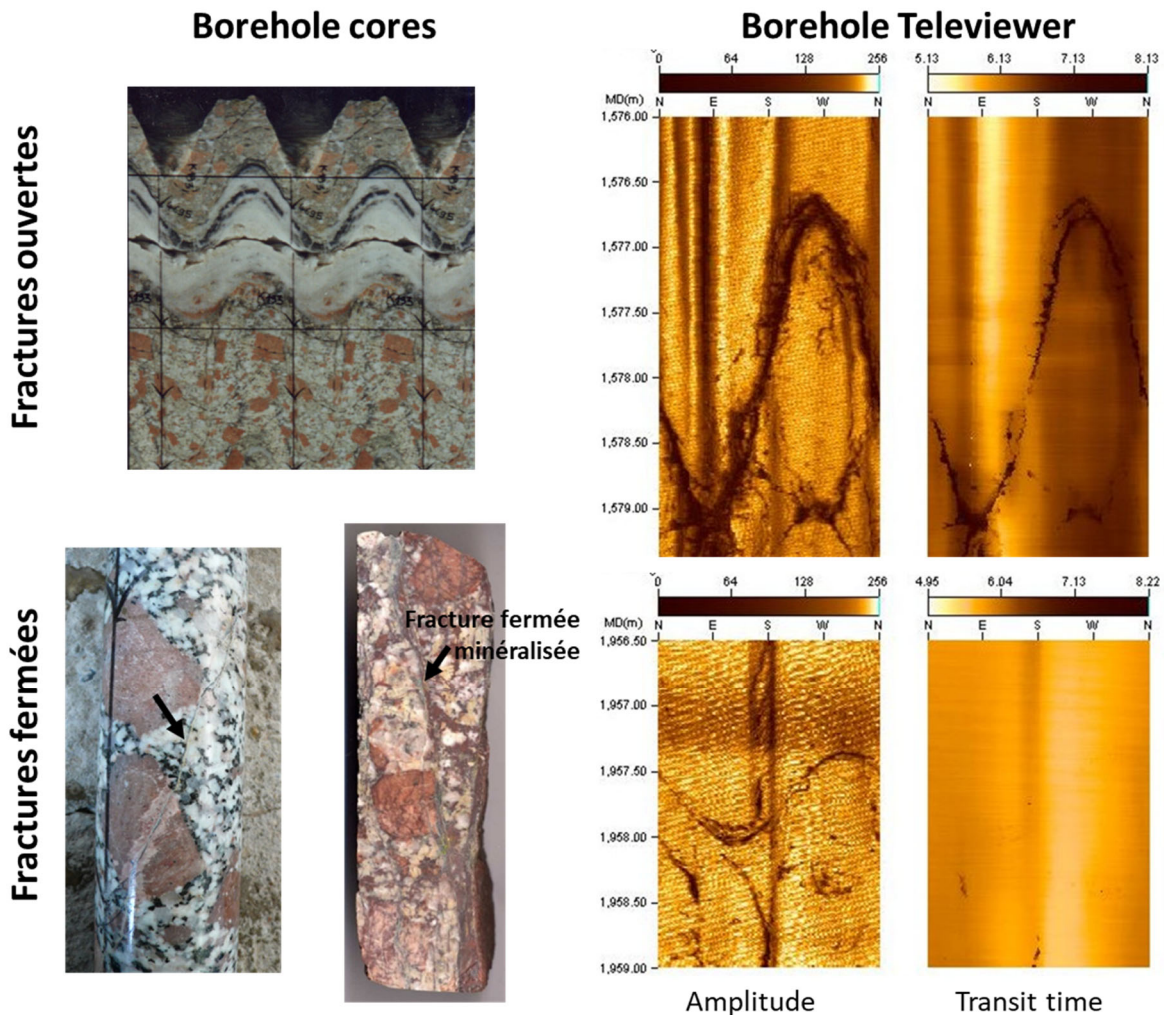


Figure 8 – Exemples de fractures ouvertes et fermées sur carottes et images de paroi BTHV (BoreHole Televiewer). Ces images traduisent deux paramètres : l'amplitude de l'onde sonore réfléchi contre la paroi et le temps de transit ou temps d'aller-retour de cette onde. Dans le cas des fractures fermées, l'image en temps de transit ne montre pas de différence entre la fracture et le reste de la paroi, ce qui indique qu'il n'y a pas d'ouverture de la fracture.

Pour autant, il n'existe pas forcément de circulation de fluide dans les fractures ouvertes, si celles-ci ne sont pas connectées entre elles. En puits, il faut associer l'observation des images de paroi, ou de carottes, aux diagraphies et données liées au fluide telles la débitmétrie, la température, les données de pH, de conductivité, de chimie du fluide, voire les traçages (Figure 9), afin de déterminer si une fracture ouverture est le siège de circulation de fluides que l'on qualifiera alors de fracture drainante.

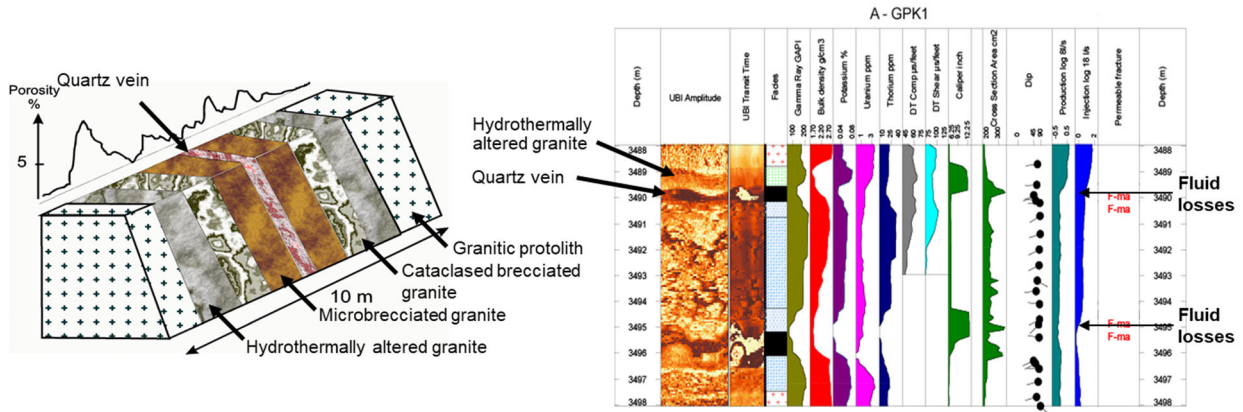


Figure 9 – Modèle conceptuel d'une zone de failles (à gauche ; Genter et al., 2000) et diagraphies aux niveaux de deux zone de failles drainantes (à droite).

Dans le cadre de mes travaux, l'étude des circulations des fluides s'est faite à plusieurs échelles. Tout d'abord, à l'échelle du réservoir de Soutz-sous-Forêts, puis à l'échelle régionale du Fossé Rhénan.

3.1. Circulations à l'échelle réservoir

3.1.1 Connexion au réservoir : les données de puits

Les puits, forés dans le cadre du projet de démonstrateur européen de Soutz-sous-Forêts, ont été largement documentés en particulier grâce à l'acquisition de nombreuses diagraphies en cours de forage et après le forage, et pendant et après les stimulations. Ces stimulations avaient pour but d'augmenter l'ouverture des fractures, grâce à l'application d'une pression hydraulique.

L'analyse détaillée des diagraphies au niveau du réservoir a consisté à mettre en parallèle, et à la même profondeur, toutes les diagraphies (diamètres, gamma ray, débitmètre, température, etc...) mais également toutes les informations à disposition (variation de faciès, fractures identifiées comme ouvertes sur les imageries, variation de pH du fluide de forage, arrivées des traceurs chimiques, etc...) qui permettent de mettre en évidence les zones d'arrivées des fluides géothermaux. C'est ce qui est détaillé dans l'article de congrès présenté ci-dessous, pour les puits GPK2 et GPK3 (Dezayes et al., 2004). L'étude montre que moins 1% des fractures conduisent le fluide au niveau du puits.

Au niveau de ces zones d'arrivée du fluide dans le puits, une analyse détaillée des fractures observées sur les images de paroi a permis de déterminer, d'une part, les orientations et, d'autre part, la signature de ces fractures drainantes.

Il apparaît que ces fractures drainantes n'ont pas de signature commune. Certaines peuvent être des zones fracturées complexes de plusieurs mètres d'épaisseur, tel qu'à 4750 m dans GPK3, des fractures avec une signature bien marquée sur les imageries de paroi mais isolées et même

des fractures peu marquées (Dezayes *et al.*, 2010) (Figure 10). Il est donc difficile de prévoir, à partir de la seule analyse de la signature des fractures sur les images de paroi, les fractures qui drainent le fluide du réservoir aux puits. Il faut alors mettre en parallèle des données hydrauliques pour définir le réseau de fractures drainantes d'un réservoir, connaissance indispensable à la modélisation hydromécanique des stimulations du réservoir.

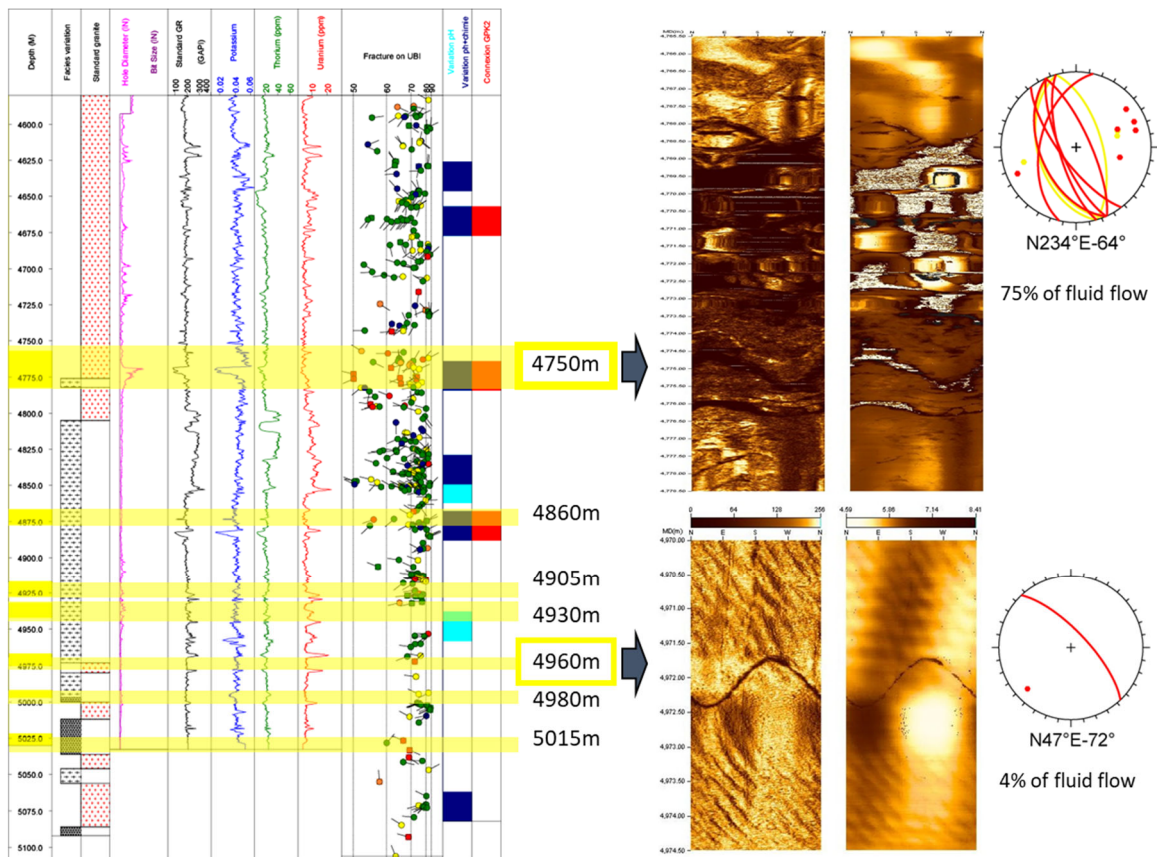


Figure 10 – Exemple de fractures au niveau desquelles il y a été observé des arrivées de fluide dans le forage GPK3 de Soultz.

Du point de vue des orientations, il ne se dégage pas non plus de tendance claire à Soultz. Il apparait cependant que, malgré la dominance de la famille de fractures N-S, en lien avec l'ouverture du Fossé Rhénan, la circulation ne se fait pas préférentiellement dans ces fractures et les fractures NE-SW et NW-SE, héritées de l'histoire hercynienne, jouent un rôle majeur (Figure 11).

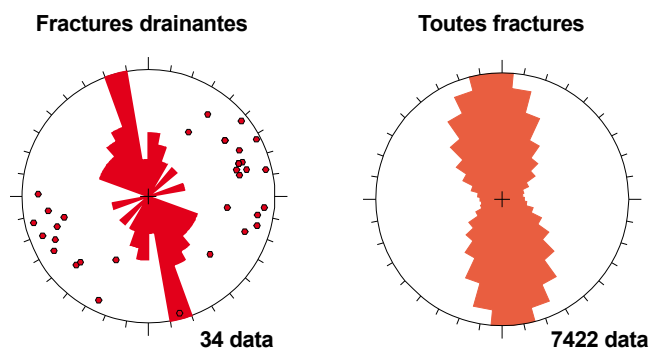


Figure 11 – Orientation des fractures drainantes et de toutes les fractures observées sur les images de paroi des puits de Soultz.

Fracture Network of the EGS Geothermal Reservoir at Soutz-sous-Forêts (Rhine Graben, France)

Chrystel Dezayes, Albert Genter and Sylvie Gentier

French Geological Survey – Geo-Energy Unit
BRGM - CDG/ENE - BP 6009 - 45060 Orléans Cedex 2, France

Keywords

EGS, fractures, fluid flow, granite, borehole image logs, Soutz-sous-Forêts, Upper Rhine Graben, France

ABSTRACT

In the framework of the EGS geothermal project at Soutz-sous-Forêts, characterizing the fracture network provides a basis for understanding both the underlying mechanisms and results of hydraulic stimulation, and the fluid circulation within the underground heat exchanger.

The Soutz site is located within the Rhine Graben, near its major western boundary fault. Five boreholes have been drilled since 1987: two relatively shallow exploratory wells (GPK1 and EPS1) and three for reservoir development and heat exploitation (GPK2, GPK3 and GPK4), all of which were drilled to depths of approximately 5,000 m, where temperatures reach 200°C. One of the exploration wells was cored; the others were partially or totally logged with borehole image logs (UBI or Ultrasonic Borehole Imager). Analysis of cores and downhole logs provides a basis for characterizing the fracture network at Soutz.

The reservoir is a fractured massif of granite overlain by 1,400 m of sedimentary cover. In a first step, the fracture network within the whole granite massif has been evaluated based on the analysis of the image logs. Fracture orientations are quite persistent in the entire massif: two main conjugate sets of nearly vertical fractures occur with a N170°E direction in all the wells, with dips both to the east and the west. This orientation is consistent with the regional tectonic framework, and the changes in dip direction may relate to major structures within the graben.

In a second step, we characterized the main permeable structures within the deep reservoir between 4,580 and 5,100 m. To evaluate the main features of these permeable structures in the open hole sections of GPK2 and GPK3, we simultaneously analyzed several sets of logs, including UBI and spectral gamma ray logs collected at the time of well completion, and

temperature and flow logs collected during hydraulic experiments. For the new borehole GPK4, completed in April 2004, the hydraulic tests have not yet been carried out yet and the geophysical logging data are not available.

In GPK2, we have identified seven fracture zones that appear to be participating in the fluid circulation. The most important zone is located at 4,780 m. However, the orientation of these zones could not be determined because there are no data from image logs available in this section. We analysed in detail the GPK3 well, which is fully documented, to improve our knowledge about the fracture network involved in the hydraulic experiments in the deep wells. In GPK3, UBI and spectral gamma ray logs are available for the whole borehole section. The analysis of flow and temperature logs measured during the hydraulic tests shows eight main fracture zones.



Figure 1. Location of the EGS Soutz site and geology of the Upper Rhine Graben. A: (1) Cenozoic sediments (2) Cenozoic volcanism (3) Jurassic (4) Trias (5) Hercynian basement (6) Boundary faults (7) Other faults (8) Temperature distribution in °C at 1500m depth (Haenel et al., 1979). (9) Local thermal anomalies (Haenel et al., 1979). B: Local map of the Soutz drill site with the well trajectories.

3.1.2 Caractérisation des fractures drainantes

A partir du constat fait au niveau des puits, la question s'est posée de la constitution interne des fractures et de leur genèse. Pour cela, les analogues de surface permettent d'avoir directement accès aux fractures sur de plus grandes dimensions et dans un volume moins restreint.

Le socle du Fossé Rhénan, ainsi que sa couverture triasique, les grès du Buntsandstein, se trouvent exposés en surface sur les épaules du graben, dans les Massifs des Vosges et de la Forêt Noire. C'est donc naturellement dans ces massifs que se situent les analogues du réservoir de Soultz, bien qu'il n'existe pas d'équivalent en surface de ce granite constituant le réservoir : granite porphyroïque à méga cristaux de feldspaths potassiques, quartz, plagioclases, biotites et hornblendes. La fracturation de ces analogues, du socle comme de sa couverture gréseuse, a été étudiée le plus en détail possible afin de caractériser l'organisation et la constitution interne des fractures. Le détail de ce travail sur les analogues du Fossé Rhénan est retranscrit dans l'article présenté plus haut (Dezayes *et al.*, 2019b) et au niveau de la transition entre le socle cristallin et la couverture gréseuse dans la carrière de Saint Pierre Bois dans l'article suivant (Dezayes *et al.*, 2021).

L'analyse structurale réalisée conjointement à l'étude minéralogique et géochimique des remplissages des fractures et de l'altération de leurs épontes a constitué une approche innovante des analogues de terrain. Dans la carrière de Saint Pierre Bois, au niveau du bassin permien de Villé, cette approche conjointe a permis de mettre en évidence l'évolution au cours du temps de la circulation des fluides dans une zone de failles (Dezayes *et al.*, 2021). Ainsi, plusieurs stades de dissolution / recristallisation affectent la circulation des fluides dans les fractures (Figure 12) :

- avant l'ouverture du bassin de Villé (anté-permien), les fluides météoritiques se sont écoulés dans le granite et ont altéré la zone centrale de la zone de failles et les failles dans la zone d'endommagement (étape 1) ;
- avec l'enfouissement du bassin, probablement du Jurassique à l'Éocène, des fluides chauds (130-150 °C) et chargés, ont circulé et altéré la zone de failles, le granite par des fractures et l'arkose par sa matrice (stade 2) ;
- le système de fractures actuel est presque totalement obstrué par des dépôts de quartz hydrothermaux, mais les fluides météoritiques froids circulent encore (étape 3).

Sur les analogues de terrain, l'ouverture des fractures observée est largement due à la décompression de surface et l'altération supergène doit être prise en compte. Cependant, il apparaît clairement que les fractures d'orientation NW-SE et NE-SW sont généralement minéralisées alors que les fractures N-S ne montrent pas de trace de minéralisation. Cette absence de dépôt indique que les circulations dans ces fractures sont froides et non chargées en minéraux. Ces fractures N-S constitueraient alors les zones de recharge du fluide météoritique dans le système. Les fractures minéralisées NW-SE et NE-SW ont été, quant à elles, le siège de circulation de fluides chauds et minéralisés, donc profonds. Ces fractures héritées de l'histoire ancienne, hercynienne à post hercynienne, ont subi plusieurs phases de cisaillement et de rejeux, entrecoupées de plusieurs phases de circulation associées à des phénomènes de dissolutions et de recristallisations (Dezayes *et al.*, 2021, 2019b).

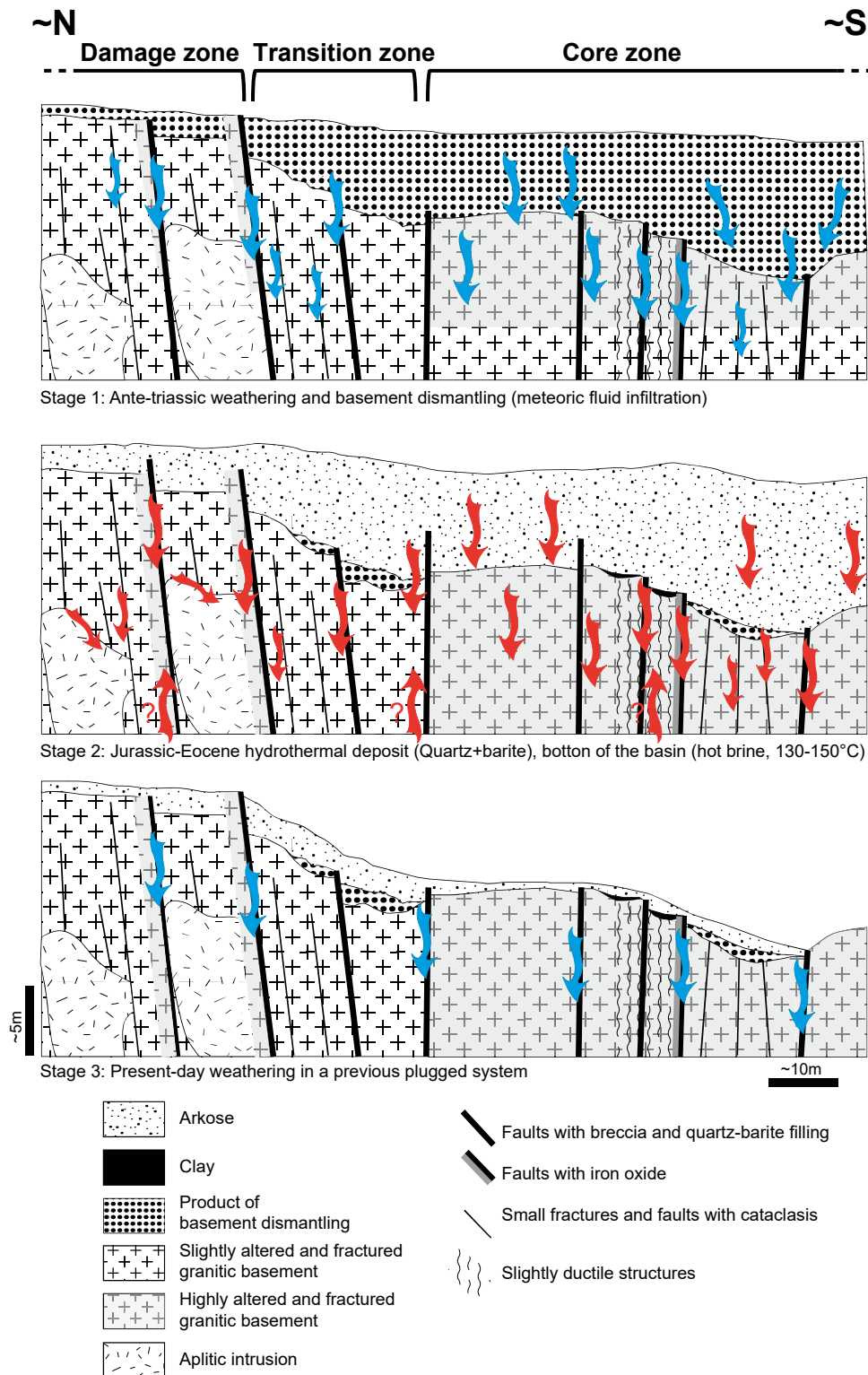
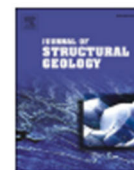


Figure 12 – Modèle conceptuel de l'évolution des circulations des fluides à l'interface socle-couverture dans la carrière de Saint Pierre Bois (Dezayes et al., 2021).



Review article

Structural control on fluid circulation in a graben system: Constraints from the Saint Pierre Bois quarry (Vosges, France)

Chrystel Dezayes^{*}, Catherine Lerouge, Christophe Innocent, Philippe Lach

BRGM, 3, Avenue Claude Guillemin, BP36009, 45060, Orléans Cedex, France

ARTICLE INFO

Keywords:

Fracture
Alteration
Porosity
Sedimentary cover-crystalline basement transition
Riedel shear zone
Rhine graben

ABSTRACT

Defining the fracture network and the active fluid pathways are fundamental to characterizing a fractured reservoir. With this goal, we chose the Saint Pierre Bois quarry (Vosges Massif, France) as a natural analogue for the Permian-Stephanian cover (arkoses)/Hercynian basement (granite) transition that serve as geothermal reservoirs, for example at Rittershoffen, Landau and Insheim, where geothermal plants exploit this kind of reservoir within the Upper Rhine Graben (URG). During our study, along walls of the quarry, we measured fracture orientation on multiple 1D scanlines, sampled fracture fills and associated wall rock, and measured porosity. Our interpretation of the fracture dataset and associated mineral deposits and alteration indicates a large unmapped fault zone (displacement around 10m) we infer to cross the quarry. This fracture zone comprises a core zone (>50 m thick), which is the most highly altered-fractured zone in the quarry. In the transition zone (20–25m thick), some E-W faults cross and displace the arkose/granite transition. The two major fracture sets (E-W and NNE-SSW strikes) are present in the damage zone (>100m thickness) and are typically randomly distributed, but sometimes are grouped in clusters (defined by high spacing coefficient of variation). The E-W fractures and faults are the result of local tectonic inheritance in relation to the Villé basin formation at the end of the Hercynian orogen. Based on rock alteration, these structures constitute good pathways for fluid, first of all for the meteoric fluid during the E-W fault zone creation associated to the Villé basin opening, and then for the hot brine, which clogged the system by quartz precipitation during the burial of the basin.

1. Introduction

According to the literature, deep geothermal energy reserves are associated with naturally fractured/faulted reservoirs in various geological contexts (Meixner et al., 2016; Aliyu and Chen, 2018; Torabi et al., 2019). Opening-mode fractures and faults, with associated dilatant parts and damage zones, provide permeability that may constitute flow pathways, especially in low-porosity crystalline rocks, such as in granite (Barton et al., 1995; Caine et al., 1996; Caine and Forster, 1999; Callahan et al., 2019; Hollingworth et al., 2019; and references therein). Fluid flow through faults or fractures is possible due to contrasts in hydraulic conductivity with the surrounding low porosity rock matrix (Gentier et al., 2000). However, the hydraulic conductivity changes with time due to fluid/rock interactions and regional deformation history (e.g. Callahan et al., 2019). Therefore, understanding fracture pattern geometry and its alteration is a major issue in the hydrogeology of fractured reservoirs (Laubach et al., 2019; Gentier et al., 2000).

Fluid-rock interactions lead to chemical changes, mineral dissolution/precipitation and to changes of rock physical properties and strength including fracture growth, shear and linkage, inducing an increasing complexity of the fault zone (Dimmen et al., 2017; Heap et al., 2017; Laubach et al., 2019; Callahan et al., 2020a,b). Field and experimental studies have shown that fluid/rock interactions depend on fluid and rock chemistries and pressure-temperature conditions (e.g. Laubach et al., 2019). The effects of temperature can be marked at shallow (less than 3 km) depths under the elevated heat flow circumstances of hydrothermal conditions (e.g. Callahan et al., 2020a,b; Drüppel et al., 2020; and references therein). Such conditions can lead to either alteration-weakening, favoring by thin clay-rich low-permeability fault cores, or precipitation-strengthening, favored by thick stiff low-permeability fault cores (Solum et al., 2010; Callahan et al., 2020a, b). These effects can vary along individual faults and between faults in a set depending on local geochemical circumstances governed, for example, by host rock composition (Laubach et al., 2014).

In the light of these recent investigations, we examine how fluid-rock

^{*} Corresponding author.

E-mail address: c.dezayes@brgm.fr (C. Dezayes).

<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104323>

Received 26 June 2020; Received in revised form 4 March 2021; Accepted 4 March 2021

Available online 18 March 2021

0191-8141/© 2021 The Author(s).

Published by Elsevier Ltd.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

[Dezayes et al. \(2021\) Structural control on fluid circulation in a graben system: constraints from the Saint Pierre Bois Quarry \(Vosges, France\).](#)

3.2. Circulations à l'échelle régionale

Depuis le début de l'exploitation en galerie du pétrole et de la potasse en Alsace, qui a débuté au XVIII^e, le Fossé Rhénan est connu pour son anomalie thermique. L'ouverture du graben a entraîné un amincissement de la croûte (Brun *et al.*, 1992) qui implique une remontée du manteau et par conséquent un flux de chaleur plus important. Cette anomalie régionale à l'échelle du fossé est doublée d'anomalies locales présentes à divers endroits. Les anomalies locales connues sont distribuées le long de la bordure ouest du fossé et sont le résultat de circulation des fluides profonds et chauds (Pribnow *et al.*, 2000).

Les puits de Soultz ont été forés au niveau de l'une de ces anomalies, celle présentant d'ailleurs le plus fort gradient thermique connu dans les premières centaines de mètres du remplissage sédimentaire. L'analyse des fluides prélevés au fond des puits (2580 à 5000 m) a montré qu'il s'agissait de saumures crustales (³He faible) à forte teneur en sel (99 à 107 g/l) et provenant d'une profondeur de plus de 4 km, d'après l'estimation des géothermomètres (225 ± 25 °C) (Sanjuan *et al.*, 2016). Leur constitution viendrait d'un mélange entre une saumure primaire formée par l'évaporation de l'eau de mer et de l'eau météorique diluée (Cathelineau *et al.*, 2010; Sanjuan *et al.*, 2016).

Les formations marines les plus profondes contenant des saumures sont les formations du Trias (Keuper, Muschelkalk et le Buntsandstein sous-jacent). Elles constituent le fond bassin au-dessus du socle cristallin du Fossé Rhénan. Avec la tectonique de rift, les zones les plus profondes, au-delà de 3500 m, se situent sur la bordure nord-est du fossé (Doebel and Olbrecht, 1974 in Rotstein *et al.*, 2006 ; GeORG, 2013). Ces zones profondes du fossé pourraient donc être, en partie, à l'origine du fluide prélevé dans les puits de Soultz. La direction entre cette zone et Soultz est globalement NE-SW, ce qui privilégie une circulation profonde du fossé le long des structures héritées des phases tectoniques hercyniennes. Cependant, les chemins ne sont pas directs et il existe probablement des sinuosités empruntant d'autres directions à la faveur de la perméabilité des fractures.

Les circulations profondes des fluides à l'échelle du Fossé Rhénan apparaissent en lien étroit avec les fractures précoces pré-rifts. L'observation de ces fractures à l'affleurement et sur carottes, montre qu'elles ont joué à plusieurs reprises durant l'histoire tectonique et leur structure en est fortement cataclasée et altérée, ce qui favorise la présence de vide et donc de perméabilité. Ces résultats corroborent les modèles de circulations profondes impliquant une recharge du système par les fluides météoritiques le long des failles bordières du fossé et une circulation transverse, globalement d'est en ouest, par les formations profondes du bassin : le socle cristallin et la base du Trias gréseux (Cathelineau *et al.*, 2010; Le Carlier *et al.*, 1994; Sanjuan *et al.*, 2016).

Les circulations verticales descendantes ont donc probablement débuté avec la mise en place des failles bordières globalement N-S dans les phases précoces de rifting (Figure 13). Le réchauffement de ces fluides en profondeur a entraîné le démarrage de boucle de convection dans les failles du socle réactivées par la tectonique d'ouverture du graben et dont les épontes vont être progressivement altérées par ces fluides météoritiques. Ce système va perdurer tout au long de la mise en place du fossé et les cellules vont s'enfouir avec la subsidence et se développer au fur et à mesure de l'altération des failles (Figure 13). Ce sont ces boucles de convection, observées dans les puits de Soultz, qui permettent la remontée des fluides chauds et la présence des anomalies thermiques à l'ouest du Fossé Rhénan, favorables à l'exploitation de la géothermie profonde.

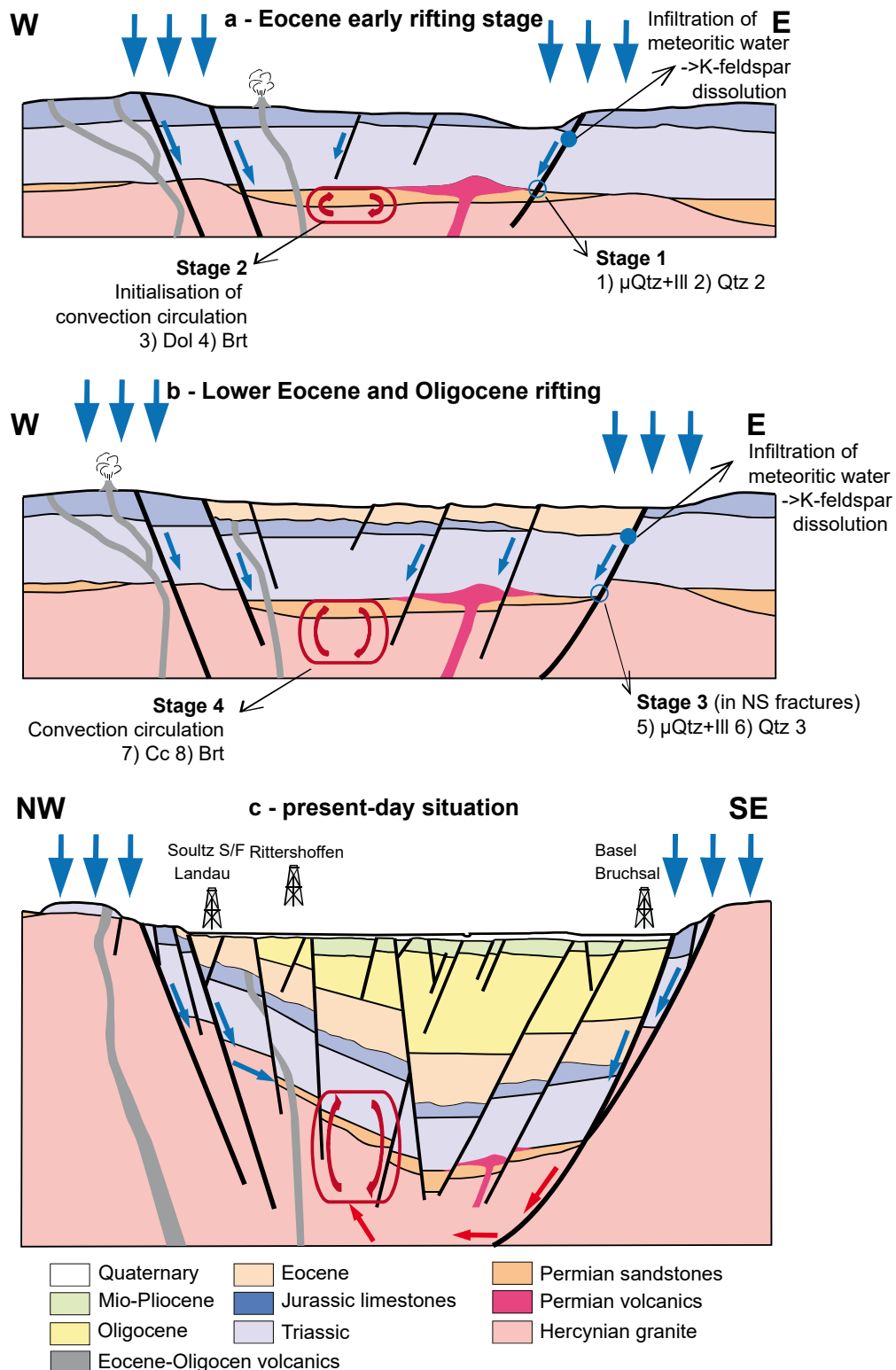
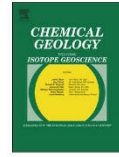
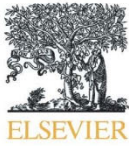


Figure 13 - Schéma de circulation des fluides dans le Fossé Rhénan et de l'interaction des roches pendant les épisodes tectoniques du Tertiaire. (a) Rifting précoce pendant l'Éocène sous compression N-S associé aux paléofluides 1 et 2. (b) Rifting de l'Éocène inférieur et de l'Oligocène sous extension E-O associé aux paléofluides 3 et 4. (c) Situation actuelle. L'emplacement des sites géothermaux est indiqué sous forme de projection approximative. Les coupes transversales conceptuelles ont été modifiées d'après Sittler (1992). L'échelle verticale est exagérée. Flèches bleues : eaux météoriques ; flèches rouges : saumures chaudes ; flèches courbes : cellule de convection. (Dezayes et al., 2019b).



Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation



B. Sanjuan ^{a,*}, R. Millot ^b, Ch. Innocent ^b, Ch. Dezayes ^a, J. Scheiber ^c, M. Brach ^b

^a BRGM, Georesource Division, Department of Geothermal Energy, Orléans, France

^b BRGM, Laboratory Division, Orléans, France

^c EEG Exploitation Minière de la Chaleur, Kutzenhausen, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 September 2015

Received in revised form 15 February 2016

Accepted 22 February 2016

Available online 26 February 2016

Keywords:

Geothermal fluid

Gas

Granite basement

Upper Rhine Graben

Geothermometer

Triassic

Oligocene

Fluid circulation

ABSTRACT

This paper is the first to present the main geochemical characteristics of the native brines collected from all the geothermal wells penetrating the granite basement underlying the sedimentary cover, in the Upper Rhine Graben. These deep wells (from 2580 to 5000 m) were only drilled in four geothermal sites (Soultz-sous-Forêts and Rittershoffen in France; Landau and Insheim in Germany). The Na–Cl geothermal brine samples collected from the granite returned TDS values ranging from 99 to 107 g/l with pH values close to 5, along with Cl and Br concentrations and δD , $\delta^{18}O$ and $\delta^{34}S$ values that indicate a multiple origin with mixing between primary brine formed by advanced evaporation of seawater (probably until the stage of halite precipitation) and dilute meteoric water, plus contributions from halite dissolution following successive marine transgression–regression cycles from the Triassic to the Oligocene. Chemical, isotopic and gas geothermometers indicate concordant reservoir temperatures close to 225 ± 25 °C for all the fluids, even though the maximum temperature so far measured on site is 200 °C. An exhaustive literature review has indicated that only the geothermal brine from the deep Cronenbourg well (2870 m) ending in the Buntsandstein has similar chemical and isotopic compositions (apart from Br and Ca) to the fluids from the granite, with an identical estimation of reservoir temperature from geothermometry. Geothermal brine from the deep Bruchsal well (2540 m), drilled down to the junction of the Buntsandstein and the Saxo-Thuringian formations, has a higher TDS value (120–125 g/l) with its chemical and isotopic compositions giving a lower estimation of reservoir temperature (190 ± 25 °C). By contrast, geothermal brine from the Bühl well (2655 m) ending in the Buntsandstein has an even higher TDS value of about 201 g/l and a lower temperature-at-depth estimation of 110 ± 25 °C, close to the temperature measured on site (115 °C). The above results indicate that the geothermal fluids collected from the granite probably originate from Triassic sedimentary formations located at great depth (≥ 4 km) with temperatures close to 225 ± 25 °C in the centre of the Rhine Graben, but that their different TDS and Cl/Br values reflect the presence of several distinct geothermal reservoirs. Many discrepancies due to high-temperature water–rock interactions are revealed on comparing the chemical and isotopic compositions of the hot brines with those of cooler brines from Bühl and the Landau Eocene–Oligocene oilfield wells, among others. The hottest brines are much enriched in K, Ca, SiO₂, Li, Rb, Cs, As, Sr, Ba, Mn, Nd, U and in metals such as Zn, Pb, Cu, Co, Cd, Sb, but are depleted mainly in Mg, SO₄ and B and have much lower isotopic Li and B signatures. The He isotopic signatures of the gases associated with these fluids ($R/R_{atm} = 0.128$ at Bruchsal and 0.252 at Insheim) confirm that the thermal anomalies are mainly crustal and not mantle-derived (1.46% and 2.88% of mantle He, respectively, for the two sites). Thus it is concluded that the thermal anomalies are associated mainly with the convective circulation of hot fluids along probable NE–SW faults between the graben's deep sedimentary centre and the fractured granite basement at its edges. Moreover, the western part of the Upper Rhine Graben (the Landau, Insheim, Soultz, Rittershoffen and Cronenbourg sites) seems to be hotter than the eastern part (Bruchsal and Bühl). According to the U–Th isotope system, the minimum transit time of these deep geothermal brines would be about 1000 years.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Several geothermal projects are in hand in the Upper Rhine Graben to develop the hot fluids (>160 °C) circulating in the deep parts of the

* Corresponding author.

E-mail address: b.sanjuan@brgm.fr (B. Sanjuan).

Perspectives

Mes travaux, présentés jusque-là, ont apporté une meilleure compréhension descriptive des réseaux de fractures et des circulations dont ils sont le siège principalement dans le contexte des réservoirs de type I et II (Figure 1).

Au-delà de cette compréhension et afin de permettre le développement de la géothermie profonde, le challenge consiste à identifier les réservoirs par une exploration intégrant l'apport de la connaissance des milieux faillés et fracturés. Les questions suivantes se posent alors pour des travaux de recherche futurs :

- Comment intégrer la connaissance des réseaux de fractures et de failles dans l'exploration géothermique ?
- Comment l'analyse structurale peut contribuer à l'estimation de la perméabilité ?
- Comment déterminer de façon plus systématique la ressource à exploiter ?
- Comment adapter l'exploration aux nouveaux concepts d'exploitation qui commencent à voir le jour ?
- Comment prendre en compte l'exploitation des produits dérivés de la géothermie dans la démarche d'exploration ?

Ces questions sont déterminantes pour un développement plus large de la géothermie dans un futur proche et afin que celle-ci soit considérée comme une véritable solution aux problèmes énergétiques et climatiques. Ce sont ces questions et la manière de les aborder qui sont développées dans cette dernière partie du mémoire.

1. COMMENT INTEGRER LA CONNAISSANCE DES RESEAUX DE FRACTURES ET DE FAILLES DANS L'EXPLORATION ?

Les sites d'exploitation de géothermie en France développés dans les années 70 à 90, que ce soit à Soultz et même dans le Bassin Parisien par exemple, n'ont pas fait l'objet d'une exploration préalable *sensu stricto*. Le choix des sites a été basé sur la connaissance antérieure des travaux miniers et surtout des grandes campagnes de prospection pétrolière réalisées dans les années 70 à 90 au niveau de tous les bassins français. A Soultz, l'exploitation du pétrole du champ de Pechelbronn, par galeries puis par forages, a permis d'identifier l'anomalie thermique et l'interprétation des profils sismiques acquis pour la recherche pétrolière a mis en évidence une structure en horst favorable à l'atteinte de la cible granitique. Seuls ces deux éléments ont servi de guide à l'implantation des forages, mais aucune acquisition complémentaire n'a été effectuée avant la réalisation du premier forage partiellement carotté (GPK1) puis du réel forage d'exploration EPS1 entièrement carotté dans la partie granitique et partiellement dans le Trias.

L'information préalable relative au sous-sol n'étant pas toujours disponible et le coût des forages restant très élevé, une phase d'exploration est essentielle au développement d'un projet de géothermie profonde. Cette exploration a alors pour objectif de réduire les incertitudes sur l'identification de la ressource. Il s'agit d'améliorer le taux de succès de production des forages futurs (Figure 14), c'est-à-dire de « dérisquer » la ressource.

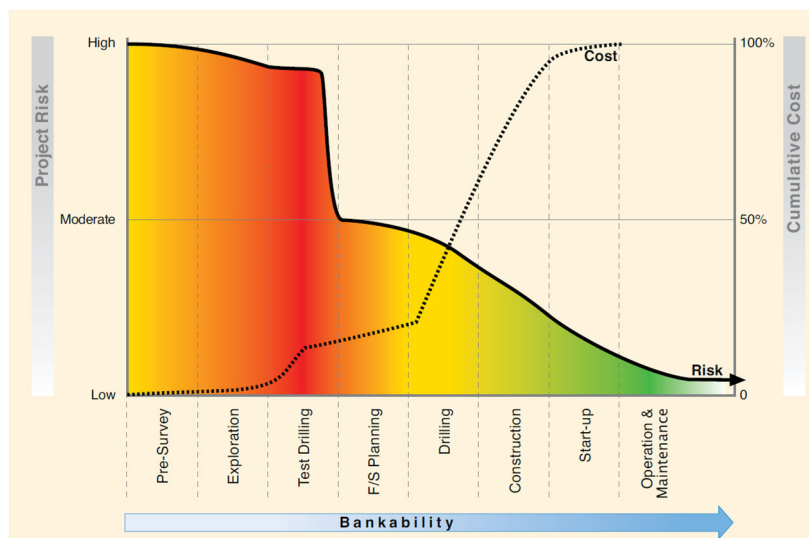


Figure 14 – Coût et risque associés aux différents stades de développement d'un projet de géothermie (Gehring et al., 2012). Le dégradé de couleur reflète le niveau de risque depuis le rouge, représentant un risque important, jusqu'au vert et blanc, représentant un risque quasi nul. La phase de forage d'exploration (Test Drilling), en rouge foncé, constitue la principale barrière d'un projet de géothermie, le coût financier d'un forage pour confirmer l'existence d'une ressource géothermale viable étant très élevé.

Dans le détail, il n'existe pas de protocole standard d'exploration géothermique, qui dépend du contexte (cf. Figure 1) et du type d'exploitation envisagé en fonction des besoins. De plus, l'exploration doit s'envisager à plusieurs échelles. A l'échelle régionale, recouvrant typiquement une structure géodynamique (bassin, rift,... ; zone d'environ 100x100 km, souvent dénommée « play »), l'objectif est alors de comprendre le système géothermal de manière globale afin de mieux cibler les zones favorables pour une exploration à une échelle plus locale d'environ 10x10 km qui constituera le champ géothermal ou « prospect ». Ce dernier délimite la zone présentant les indices d'un fluide à une température la plus élevée possible se situant à une profondeur la moins élevée possible, dans tous les cas économiquement réalisable. Il s'agit en général de la zone du Permis Exclusif de Recherche (PER) demandé par les industriels aux autorités nationales. Cette zone peut alors contenir une ou plusieurs formations pouvant faire office de réservoirs, dont les caractéristiques (porosité, perméabilité, débit, température, ...) seront définies par un forage d'exploration.

Dans le Fossé Rhénan, les études antérieures, plutôt fondamentales sur la mise à place du graben, et nos études sur les circulations profondes, ont apporté beaucoup d'éléments à l'exploration d'échelle régionale. Il reste cependant quelques interrogations, comme la datation de la chronologie des phases de circulations anciennes, en particulier la datation des carbonates dans les failles, pour mieux comprendre les circulations passées et mieux appréhender les zones de recristallisation et donc de porosité réduite.

Il s'agit également de déterminer l'origine et le rôle dans les chemins de circulation de la famille de failles E-W, présente géographiquement de façon hétérogène.

Pour comprendre les circulations profondes et mieux les cibler pour les exploiter, la méthode de modélisation hydrothermique à l'échelle du fossé est maintenant en bonne voie (Armandine et al., 2019). Cependant, le réseau de failles utilisé n'est pas optimal, en particulier dans le socle, et doit donc être amélioré. Pour cela, il s'agira d'apporter des éléments d'information sur les structures du socle hercynien en tenant compte du rôle de ces structures dans la circulation.

Au-delà du Fossé Rhénan, l'exploration des contextes géothermaux de type III et IV (Figure 1), où le réservoir est plutôt contrôlé par la matrice de la roche, ne prends pas forcément en considération les failles et les fractures. Or, les failles peuvent être déterminantes dans le fonctionnement du système, pouvant, d'une part, participer à la perméabilité, et d'autre part, être des limites de compartiments hydrauliques. Les phases d'acquisition de données et de conceptualisation du système géothermal devront donc prendre en compte les failles et les fractures à toutes les échelles. Une étude structurale détaillée des affleurements présents dans la zone et sur les analogues du réservoir ciblé sera donc complémentaire aux acquisitions géophysiques et apportera des éléments essentiels à l'estimation de la perméabilité du milieu. Elle pourra également mettre en évidence des zones de failles non cartographiées et difficiles à distinguer sur le terrain et/ou avec des outils géophysiques, mais qui peuvent s'avérer essentielles dans la compréhension du système.

2. COMMENT L'ANALYSE STRUCTURALE PEUT CONTRIBUER A L'ESTIMATION DE LA PERMEABILITE ?

Traditionnellement dans la démarche d'une exploration géothermique, l'étude géologique consiste à apporter le cadre litho-stratigraphique et tectonique du système géothermal (Harvey *et al.*, 2014). Elle permet d'avoir une image de la géologie locale et régionale et d'identifier les données manquantes et les hypothèses à vérifier avec les études géochimiques et géophysiques. La géologie et l'image qu'elle va apporter constituent la base des modèles conceptuels et numériques du système géothermal. Il s'agit donc d'un élément déterminant dans la recherche des zones favorables.

Les études litho-stratigraphiques permettent de définir la distribution des formations en profondeur à partir de cartographies en surface et/ou d'analyses de données de puits (coupes géologiques, logs géophysiques). Les formations réservoirs sont alors identifiées et caractérisées du point de vue géométrique (profondeur, épaisseur, forme, ...) ainsi que par leur nature et leurs propriétés réservoirs (porosité, perméabilité). Ainsi, classiquement, les roches dites « réservoirs », c'est-à-dire ayant une perméabilité suffisante pour stocker du fluide, sont les grès, les calcaires, les coulées pyroclastiques, les brèches, ...

Aux études litho-stratigraphiques s'ajoutent les études structurales. Nous avons vu que les structures géologiques, et en particulier les structures tectoniques de types « fractures et failles », constituent les éléments essentiels de la perméabilité d'un système géothermal en tant que zone d'alimentation, de circulation et de stockage. Dans de nombreux cas où la perméabilité est insuffisante pour une exploitation économiquement rentable de la géothermie, la présence de discontinuités, à toutes les échelles, va aider à l'extraction des fluides que ce soit de manière naturelle ou après stimulation. Il est donc indispensable de réaliser une étude structurale afin d'évaluer de manière la plus précise possible l'apport des structures à la circulation des fluides et à la connexion potentielle au réservoir.

2.1. Les structures à grande échelle

Les structures à grande échelle constituent des objets géologiques de plusieurs dizaines de kilomètres d'extension. Elles sont qualifiées de « failles régionales » et permettent la circulation et la remontée de fluides profonds et chauds sur plusieurs dizaines de kilomètres. Ce sont cependant des objets complexes qui peuvent aussi bien constituer des drains ou des barrières, voire même les deux à la fois selon l'endroit considéré.

Depuis les années 2010, les zones de failles sont la cible des opérations de géothermie profonde développées par les industriels dans le Fossé Rhénan, ce dernier constituant un système fracturé

de type I et II (Figure 1). Ce concept de zone de failles réservoir provient de l'expérience de Soultz où l'un des puits, GPK3, a recoupé une zone de failles très productive et donc difficile à stimuler hydrauliquement (Dezayes *et al.*, 2010). Les projets qui ont suivi (Rittershoffen, Vendenheim, Illkirch) ont alors pris pour cible les grandes structures du fossé rhénan, bien identifiées par les profils sismiques anciens, dans le but de produire sans avoir à stimuler, ou en stimulant peu et éviter ainsi tout risque de sismicité induite. Or, si le projet de Rittershoffen fut un succès (Baujard *et al.*, 2017), ce ne fut pas le cas du projet à Vendenheim, qui a connu d'importants problèmes de forage et surtout qui a engendré une sismicité induite de magnitude 3.6 entraînant l'arrêt de l'opération (www.geoven.fr/), ainsi que celle Illkirch, dont le premier puits foré n'est d'ailleurs pas assez productif pour une exploitation économiquement viable par un doublet, stoppant ainsi pour le moment tout développement de géothermie profonde en Alsace. Il est donc essentiel de revoir les cibles et de les envisager comme réseau de fractures dense et connecté tel qu'exploité à Soultz.

L'état de contrainte qui s'exerce sur les failles engendre des zones de compression ou de dilatance suivant l'orientation des zones de failles par rapport au tenseur. Dans le fossé rhénan, le réseau de failles à l'échelle régionale est complexe du fait de l'histoire tectonique et l'ouverture du graben sur un socle déjà structuré par l'orogénèse hercynienne (GeORG, 2014). Il convient donc de développer des modélisations hydromécaniques sur des schémas structuraux de réseaux de failles plus réalistes pour permettre l'identification ces zones de dilatance qui permettent la circulation.

Parallèlement à ce développement de la modélisation, l'image du réseau de failles en profondeur doit être améliorée à partir des acquisitions géophysiques. Dans les contextes comme le Fossé Rhénan, les profils sismiques anciens, réalisés entre les années 70 et 90 pour la prospection pétrolière, sont très utiles mais insuffisants du point de vue de l'image en profondeur et en 3 dimensions. Leur objectif ayant été les réservoirs d'huile du Tertiaire, ils ont été calibrés pour imager au mieux ces derniers et donc les formations sous-jacentes sont moins bien détectées. C'est particulièrement le cas pour les formations de fond de bassin et le toit du socle qui sont difficilement visibles et identifiables sur ces profils anciens. De plus, ces profils ont été très majoritairement réalisés sur un axe Est-Ouest, perpendiculairement à la structuration Nord-Sud tertiaire du Fossé. Or, des structures principalement NE-SW, NW-SE et E-W, et qui constituent l'héritage hercynien du fossé, sont présentes et très mal imagées. Il convient donc, d'une part, de développer l'imagerie géophysique dans ce type de contexte et, en particulier, de développer l'utilisation et la mise à disposition de la sismique 3D bien plus performante, permettant d'apporter plus de précision et une vision des structures dans l'espace 3D. D'autre part, des approches par Machine Learning se développent pour l'identification des failles sur les profils sismiques (Celecia *et al.*, 2021). Si de nombreux profils sismiques sont disponibles, comme dans le Fossé Rhénan, l'application de ces méthodes permettrait de diminuer le temps d'interprétation de ces profils et donc de disposer de plus de données pour réaliser des interpolations 3D pour améliorer l'image du réseau de failles régionales.

2.2. Les structures à l'échelle locale

La perméabilité d'une formation est conditionnée par la présence de fractures et de failles à plus petite échelle, la mésofracturation. Pour estimer cette perméabilité de fracture, il est possible de travailler sur des analogues en surface de la formation ciblée en profondeur. Cette formation peut par exemple se retrouver à l'affleurement dans les contextes de rifting avec des failles normales de fort rejets (Fossé Rhénan), ou dans le cas de systèmes volcaniques avec déplacement du centre d'émission (Mayotte). L'analyse détaillée du réseau de fractures peut alors se faire le long d'une direction ou sur une surface, afin de déterminer les caractéristiques principales de ce réseau : densité de fractures, orientation, remplissage, ouverture et connectivité. Ces propriétés

sont intrinsèquement liées avec la perméabilité de la formation. Cependant, l'ouverture d'une fracture est une valeur très difficilement mesurable puisqu'en surface les phénomènes d'érosion augmentent l'ouverture qui serait probablement plus réduite en profondeur. De plus, les familles d'orientation généralement présentes apportent une anisotropie de perméabilité dont il va falloir tenir compte sous forme de tenseur dans les modèles hydrodynamiques.

Afin d'apporter des éléments à la caractérisation du réservoir et d'aider à sa modélisation hydrodynamique, il convient de mieux appréhender le passage des éléments quantitatifs qui caractérisent un réseau de fractures à une estimation de la perméabilité, et cela au-delà de la loi cubique faisant intervenir la valeur de l'ouverture hydraulique des fractures. Cette problématique, liée également à la rugosité des fractures et à la chenalisation des écoulements, est travaillée dans le monde de l'hydrologie depuis les années 90, mais devrait être poursuivie pour le compte des réservoirs géothermiques.

3. COMMENT DETERMINER DE FAÇON SYSTEMATIQUE LA RESSOURCE A EXPLOITER ?

A ce jour, la localisation d'une ressource géothermale est d'abord faite par la discussion plus ou moins concertée entre les trois grandes disciplines géoscientifiques (géologie, géochimie, géophysique) autour des données acquises, mettant souvent en exergue l'une ou l'autre de ces disciplines suivant le contexte. Cette façon relativement empirique de fonctionner a permis l'exploitation de nombreux champs géothermaux dont les évidences étaient présentes en surface (par exemple : sources chaudes, fumerolles, travertins, ...) et laissaient donc peu d'incertitude quant à la présence d'un réservoir en profondeur, mais elle a montré ses limites.

Pour développer la géothermie au-delà de ces champs évidents (Islande, Larderello, Geysers, Indonésie, etc...), il a fallu aller, d'une part, vers leurs périphéries et, d'autre part, vers les autres systèmes plus profonds, moins perméables et qui ne présentent pas d'indice en surface (blind geothermal systems). Il s'est alors développé des méthodes plus systématiques de définition des zones cibles. Il s'agit, d'une part, de mieux comprendre le système géothermal par la modélisation hydrothermique de son fonctionnement présumé, et d'autre part, de se faire confronter les données apportant des informations sur le système.

3.1. Les différentes modélisations des systèmes géothermaux

Afin de confronter les connaissances apportées par les acquisitions géologiques et géophysiques, les données disponibles sont représentées de manière systématique et géospécialisée en 3 dimensions dans un modèleur 3D permettant ainsi de placer les données, observations et interprétations dans l'espace (Calcagno *et al.*, 2008). La réalisation d'un modèle géologique 3D permet, d'une part, de rassembler tous les protagonistes des différentes disciplines autour d'un même outil et, d'autre part, d'obtenir une visualisation dans l'espace, facile à manipuler et à présenter aux différents acteurs du projet, experts et non-experts (industriels, politiques, décideurs, ...).

Cependant, ce type de modèle géologique n'est que géométrique et n'inclut donc pas le fonctionnement hydrothermal, voire mécanique et même chimique, du système géothermal. Pour cela, il faut dans un premier temps réaliser un modèle conceptuel de ce système. Il s'agit d'une représentation schématique des différentes interprétations menant à la compréhension des circulations, recharges, décharges, source de chaleur, caractéristiques du réservoir, etc.... (Robertson-Tait, 2013 ; Harvey *et al.*, 2014). Le modèle conceptuel est ensuite continuellement modifié et amélioré au fur et à mesure que de nouvelles données sont disponibles, ajoutant un niveau de détail et de confiance au modèle initial. Il doit permettre de comprendre de manière

justifiable la distribution de la température, les chemins de circulation des fluides et le contexte géologique dans lequel la ressource se situe. La représentation de ce modèle conceptuel peut être réalisé en carte, en coupe ou en 3D selon le niveau d'information, la 2D étant plus facilement représentable (Figure 15).

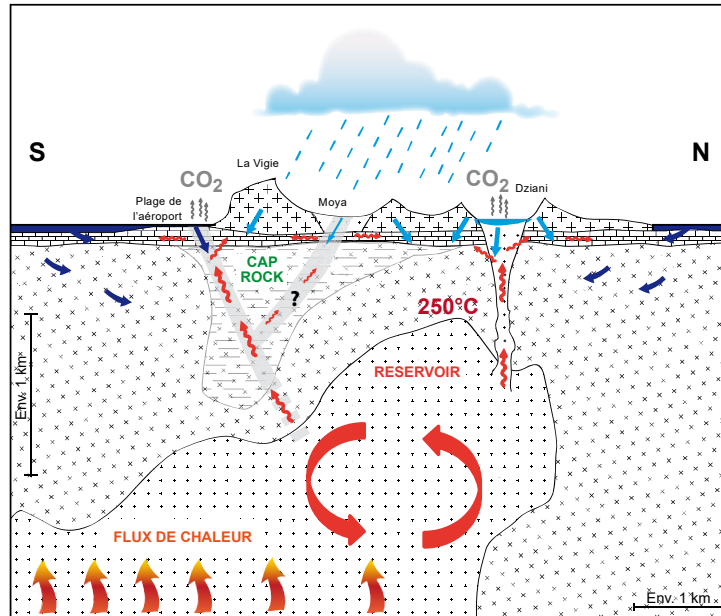


Figure 15 – Exemple de modèle conceptuel en coupe du système géothermal de l'île de Petite Terre à Mayotte (Dezayes et al., 2023; Traineau et al., 2006).

Le modèle géologique et le modèle conceptuel du système géothermal constituent la base de modélisations numériques. L'objectif est alors d'introduire des processus physiques et dynamiques dans le modèle géologique statique, tels que les processus hydrauliques, thermiques et parfois mécaniques, de manière couplés ou non (Figure 16). Les récents développements d'outils permettent actuellement de réaliser des modèles hydrothermiques en milieu faillé (Lopez et al., 2018). Le modèle géologique, généralement réalisé à partir de fonctions implicites (Geomodeller par exemple), est maillé de manière la plus fine possible et des propriétés hydrauliques et/ou thermiques sont affectées aux différentes mailles. Des lois physiques, telles que la loi de Darcy, les lois de comportements mécaniques, etc..., sont alors appliquées au modèle afin de simuler le fonctionnement du système géothermal (Armandine et al., 2019).

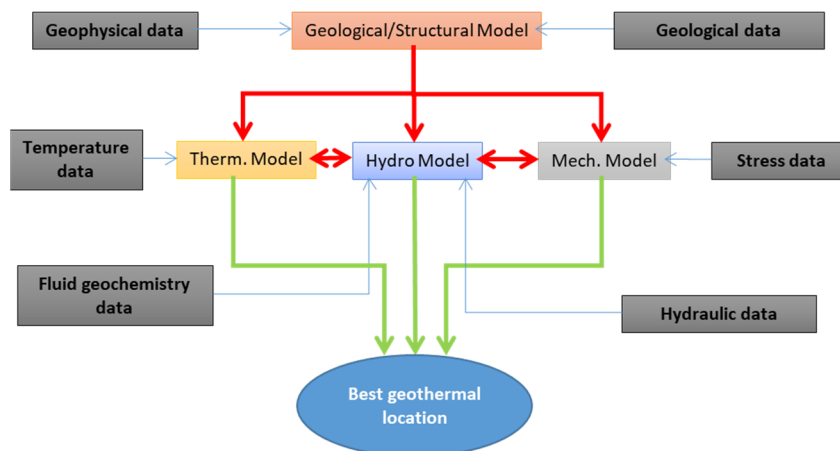


Figure 16 – Workflow général d'exploration intégrant des modèles physiques thermique, hydraulique et mécanique (Dezayes et al., 2019a).

Cependant, ces modélisations n'intègrent pas la notion d'incertitude dans leur calcul. Or, la complexité du milieu naturel est difficile à reproduire et celui-ci est souvent simplifié pour des raisons de calcul. Il s'agit donc d'intégrer le plus possible de réalité de terrain dans les modèles géologiques et en particulier dans la représentation et la caractérisation des failles et fractures, dans l'hétérogénéité des familles et leurs caractéristiques internes de perméabilité.

3.2. Analyse multi-critère des données

Une autre approche consiste à réaliser une analyse multi-critère des données à partir de leur intégration géospécialisée. Il s'agit d'une méthode inspirée de l'industrie pétrolière, nommée Play Fairway Analysis (PFA), et basée sur les nombreuses données acquises dans le cadre de cette industrie (par ex. Dixon *et al.*, 2010). Depuis le début des années 2000, cette méthode se développe dans le monde de la géothermie (Prol-Ledesma, 2000; Noorollahi *et al.*, 2008; Yousefi *et al.*, 2010; Trumpy *et al.*, 2015; Lautze *et al.*, 2017; Lindsey *et al.*, 2021; Dezayes *et al.*, 2022a). Au-delà de rassembler toutes les données disponibles sur une zone géographique, l'objectif est de proposer des critères pour permettre l'aide à la décision. Ainsi les différents types de données sont affectés d'un poids en lien avec leur importance relative concernant la présence d'une ressource géothermale (Lindsey *et al.*, 2021). Les données prises en compte pour cette analyse sont généralement les données en lien avec la source de chaleur, la perméabilité et la présence de fluide (Figure 17), mais peuvent varier suivant le type de réservoir.

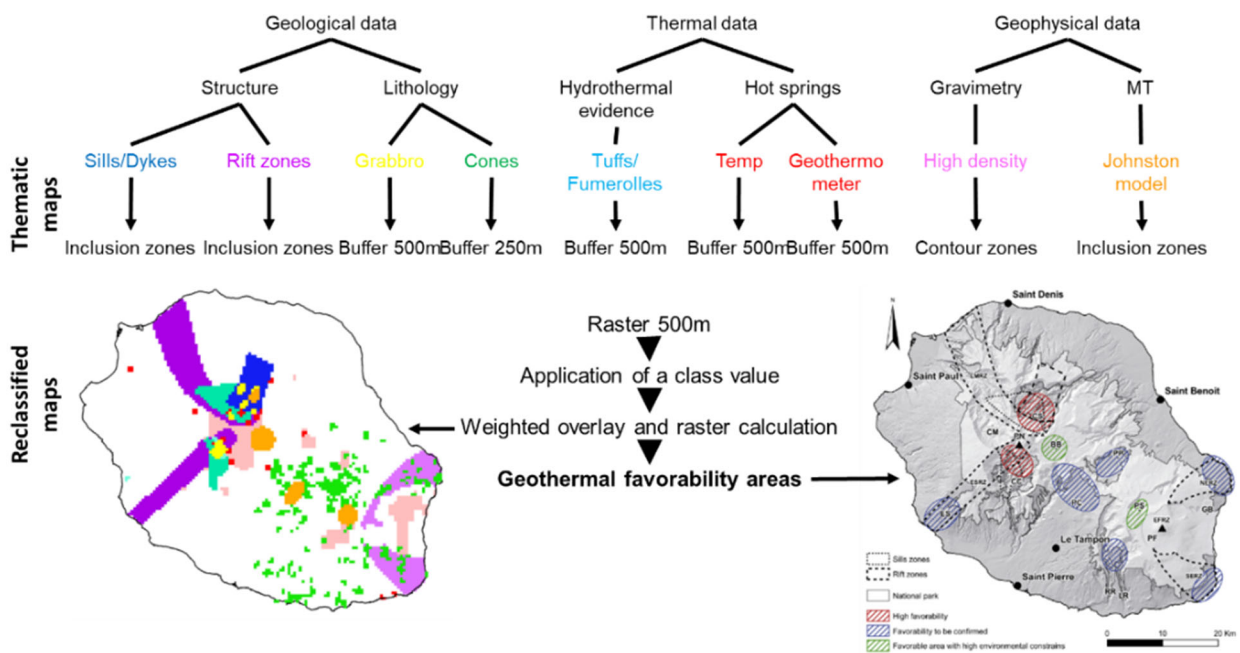


Figure 17 - Données prises en compte et diagramme de génération des cartes de favorabilités à La Réunion (Dezayes *et al.*, 2022a)

Par exemple, dans le cas de l'île de Petite Terre à Mayotte, contexte de type III (Figure 1), les indicateurs et les données pris en compte sont les suivants (Dezayes *et al.*, 2023) :

- Source de chaleur : émanation de CO₂ d'origine magmatique, géothermomètres indiquant une température du réservoir supérieure à 200°C, volcanisme récent, crise sismique actuelle, anomalie de conductivité électrique à 12 km de profondeur
- Présence d'un réservoir : transition rapide de la résistivité électrique entre une formation conductrice (<10 Ω.m) dans les 600 m premiers mètres et une formation plus résistante

(entre 10 $\Omega.m$ et 60 $\Omega.m$), interprétée comme un niveau de couverture surmontant un réservoir hydrothermal.

- Perméabilité : fracturation, alignement d'édifices volcaniques récents probablement le long d'une zone de fragilité crustale, activité sismique, émanation de CO_2 , zone de failles interprétée à partir des profils électriques et électro-magnétiques.

Les différents types de données sont affectés d'un poids en fonction de leur influence sur les indicateurs et leur combinaison géospatialisée fournit une carte de zones favorables à l'exploitation de la géothermie (Figure 17 et Figure 18).

Le PFA constitue une méthode simple à mettre en œuvre, adaptable et qui, dans le cas de notre étude sur Mayotte, montrent de bons résultats puisqu'une comparaison avec un modèle hydrothermique indique les mêmes zones favorables à l'implantation de forage (Figure 18).

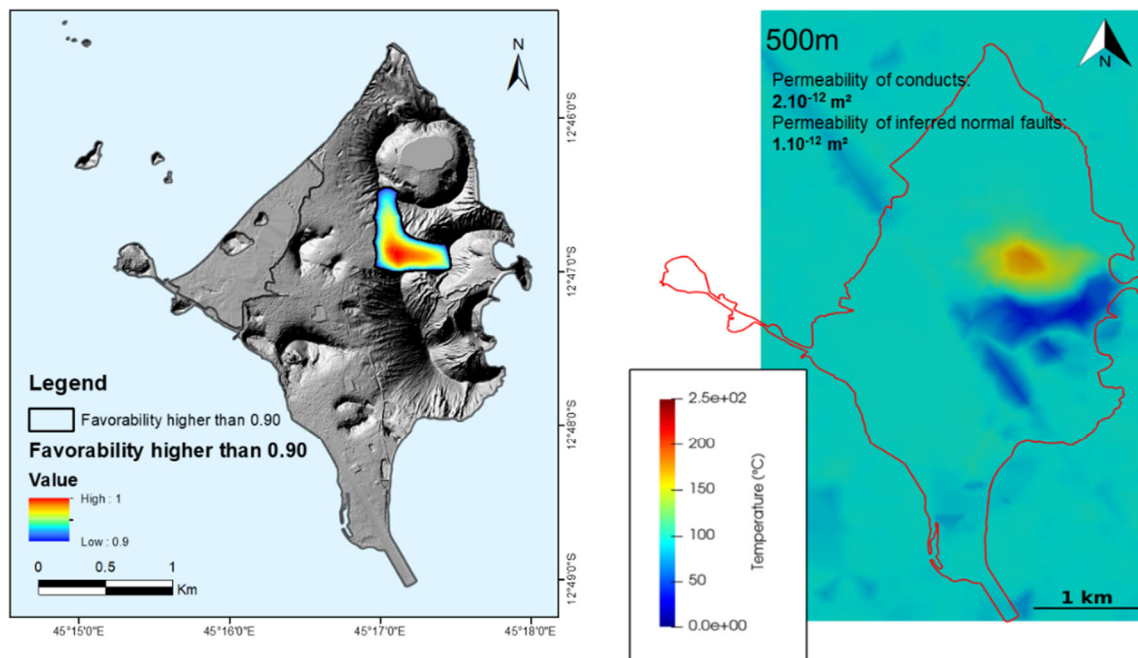


Figure 18 - Résultats de l'analyse SIG (à gauche) et de la simulation hydrothermique (à droite ; températures simulées à 500 m de profondeur) sur l'île de Petite Terre à Mayotte (Stages respectifs d'Ernesto Serrano et de Thomas Farlotti dans Dezayes et al., 2023).

Cependant, les poids attribués aux différentes données sont fortement dépendantes des décisions d'expert et reste donc une interprétation géologique avec toutes les incertitudes et les réserves qui vont avec. Il est donc impératif de prendre en compte les incertitudes de chaque type de données et de leur interprétation et ainsi de pouvoir les quantifier et les représenter, afin d'aider les parties prenantes dans leur décision de poursuivre ou non les investigations et d'en assumer les risques.

3.3. Vers l'assimilation de données

Les moyens de calcul ayant beaucoup évolué ces dernières années, le stockage et l'assimilation d'un nombre important de données (Big Data) sont plus aisés et permettent donc d'envisager l'utilisation de nouvelles méthodes numériques. Ainsi, les méthodes de Machine Learning et

d'Intelligence Artificielle commencent à voir le jour dans la démarche d'exploration géothermique (Moraga *et al.*, 2022; Mordensky *et al.*, 2023). Elles permettent d'éviter le biais de la décision d'expert par le fait qu'elles sont guidées par les données (data-driven), mais les algorithmes utilisés doivent encore être développés pour être robustes, rapides et améliorer la prédictivité.

Pour cela, il faudra tout d'abord développer la méthode et les algorithmes sur des zones géographiques bien connues du point de vue géologique et géothermique, possédant de nombreuses données et permettant le calage de ces modèles. Certains bassins, comme le Fossé Rhénan, seraient alors de bons candidats. A une plus petite échelle, certains secteurs des DROM pourraient servir également au développement de la méthode, d'autant plus que des projets de forages sont prévus dans les années à venir et pourraient confirmer ou infirmer la prédictivité.

L'objectif, à plus long terme, sera l'aller vers l'exploration de zones où peu de données sont disponibles et où le sous-sol est peu connu, afin de développer des scénarii d'acquisition ciblés pour une exploration à moindre coût.

4. COMMENT ADAPTER L'EXPLORATION AUX NOUVEAUX CONCEPTS D'EXPLOITATION?

Plusieurs prises de risque limitent le développement de la géothermie profonde et sont intrinsèques aux réservoirs. Les deux principaux types de risque sont le risque géologique, lié à l'existence de la ressource, et le risque sismique, lié à l'exploitation et au développement du réservoir. La réinjection des fluides constitue également un facteur de risque quant à la pression interne élevée du réservoir et au risque de colmatage engendré par l'injection d'un fluide plus froid que la formation, principalement dans les formations clastiques.

D'autres éléments se doivent également d'être pris en compte pour améliorer le développement de la géothermie profonde. Il s'agit d'augmenter la productivité des opérations et d'en diminuer leur coût, dont le forage constitue le plus gros poste.

Pour pallier cela, de nouveaux concepts, basés sur l'exploitation plus systématique de la chaleur et qui se veulent plus adaptables, évolutifs et surtout moins dépendants du contexte géologique tout en espérant limiter le risque sismique, commencent à voir le jour outre-Atlantique et en Europe. Ces concepts, qui reposent sur l'évolution des EGS et l'adaptation des techniques HDR (Hot Dry Rock), sont parfois appelés EGS2.0 ou AGS pour Advanced Geothermal Systems (Çiçek, 2020). Ces approches reposent sur l'évolution des technologies de forage de ces quinze dernières années, principalement en lien avec l'exploitation des gaz de schiste, et sont suivies avec de plus en plus d'attention par les compagnies de forage et les compagnies pétrolières qui commencent à regarder avec intérêt vers la géothermie profonde.

Parmi ces nouveaux concepts, on peut citer (Figure 19) :

- les boucles fermées de type EAVOR ou GreenFire qui vise à limiter au maximum le risque géologique (Fallah *et al.*, 2021) par l'exploitation de la chaleur en faisant circuler un fluide dans un forage tubé en forme de U à des profondeurs supérieures à 1500 m (Toews *et al.*, 2021) (Figure 19-A) ;
- la stimulation échelonnée développée pour l'exploitation des gaz de schistes et qui permet de développer le réservoir par injection à faible pression évitant probablement le déclenchement de la sismicité induite (Shiozawa *et al.*, 2014; Zingg *et al.*, 2019) (Figure 19-B) ;
- l'exploitation de fluides supercritiques en périphérie de champs volcaniques qui garantit une forte productivité (Reinsch *et al.*, 2017) ;

- l'utilisation du CO₂ comme fluide caloporteur pour améliorer le taux d'extraction de la chaleur et participer au stockage du CO₂ (Brown, 2000; Fouillac *et al.*, 2004; Kervevan *et al.*, 2014; Pruess, 2006) (Figure 19-C) ;
- la réalisation de forages horizontaux ou multi-drains pour augmenter la longueur de réservoir traversé par le puits et améliorer ainsi la performance d'une opération géothermique (Ungemach *et al.*, 2019) (Figure 19-D) ;
- l'utilisation de mono-puits en système ouvert ou fermé (Falcone *et al.*, 2018) qui se limite à la réalisation d'un seul forage ou à la réutilisation d'anciens puits pétroliers profonds (Figure 19-E et F).

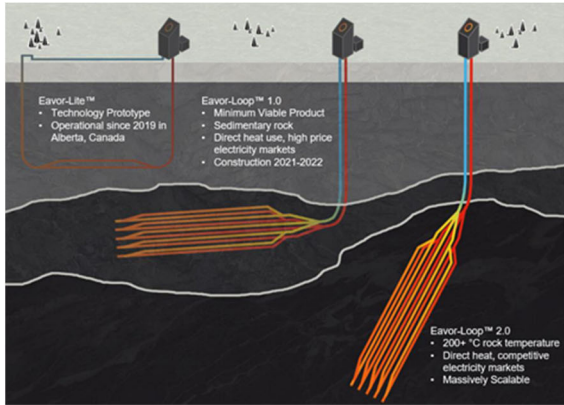
La grande majorité de ces nouvelles technologies vise à s'affranchir, au moins en partie, des conditions géologiques, en particulier de la présence de fluide. Cependant, la nature du sous-sol reste l'élément primordial pour l'exploitation de la géothermie profonde.

Dans le cas des systèmes en boucle fermée profonde de type EAVOR ou mono-puits, il est préférable d'être dans un milieu homogène, une couche sédimentaire ou une formation volcanique, afin d'éviter les interférences de conductivité thermique le long du forage. Ces formations doivent avoir une bonne conductivité thermique, ce qui est généralement le cas des roches à porosité et perméabilité faible. Il faut cependant noter que les vitesses d'avancement du forage dans ce type de formation sont plus faibles, ce qui augmente le temps et donc le coût du puits. Il est également préférable que le milieu ne soit pas trop fracturé afin d'éviter les problèmes de coincement des outils pendant la phase de forage.

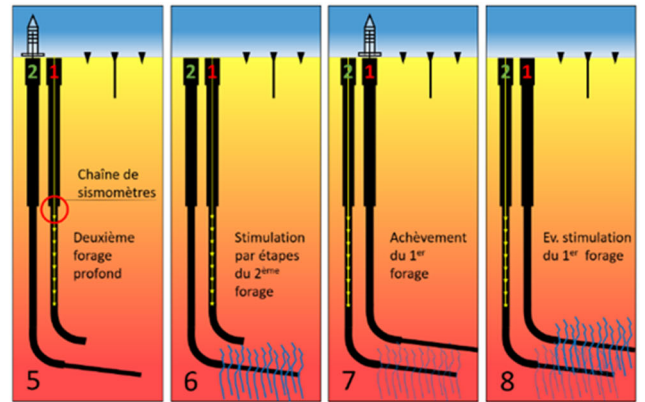
La mise en place des nouveaux designs de puits, types multi-drains et forages horizontaux, comme les mono-puits ouverts, requièrent quant à elle la présence d'un réservoir hydrothermique avec des niveaux producteurs de préférence tabulaire pour faciliter l'accès par les forages.

Quant au concept de stimulation échelonnée, sa mise en place doit nécessiter des injections hydrauliques courtes et à faible pression donc dans un milieu déjà endommagé par la fracturation naturelle. Afin de faciliter cette stimulation, il est préférable de se situer dans une formation fracturée de manière dense et homogène, cette situation permettant également d'éviter les problèmes de forage qui peuvent subvenir en traversant de grandes zones de fractures.

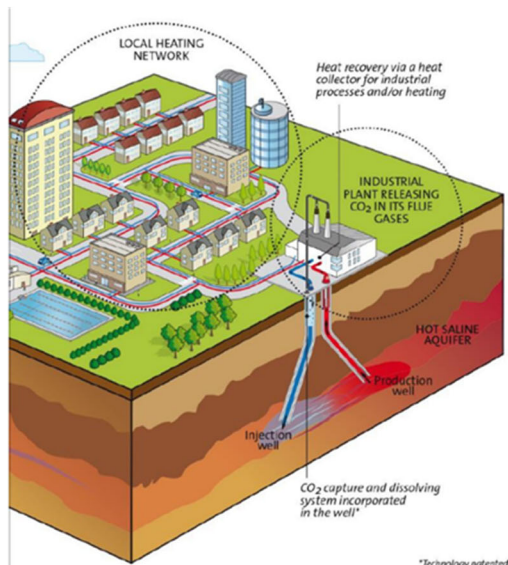
Les études structurales restent donc indispensables en amont de ces nouveaux concepts afin d'assurer leur bon développement. Il faudra également s'attacher davantage à la caractérisation intrinsèque des formations et en particulier de leurs propriétés pétrophysiques (porosité, conductivité thermique), indispensable dans l'exploitation directe de la chaleur.



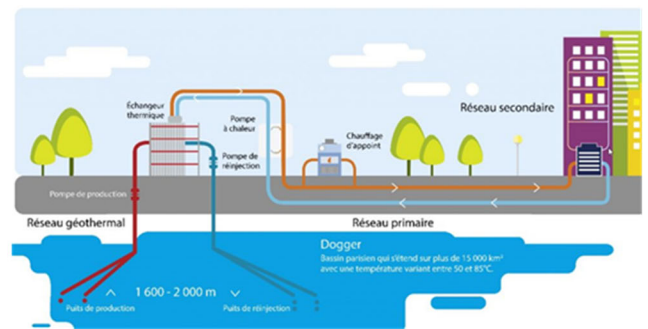
A – Eavor-Loop



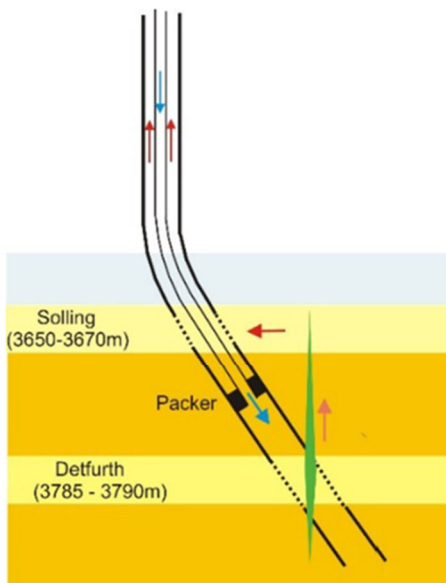
B – Multi-stage fracturing



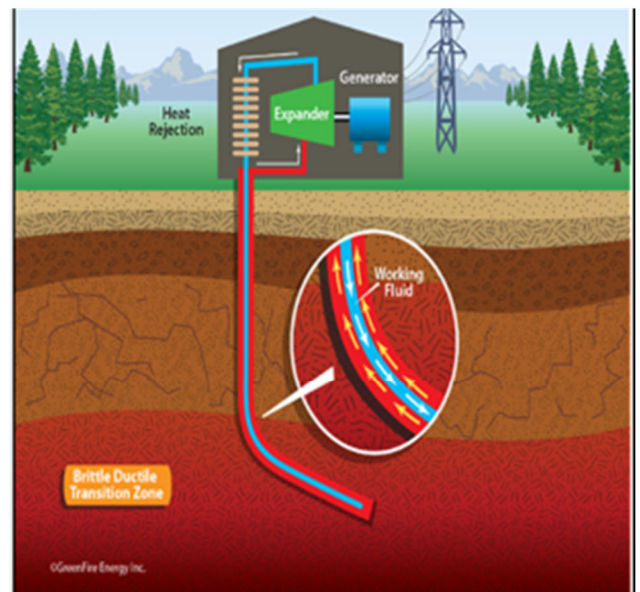
C – CO₂ DISSOLVED concept



D – Multi-drains



E – Mono-puits ouvert



F – Mono-puits fermé

Figure 19 – Les nouveaux concepts d'exploitation de la géothermie profonde. Explications dans le texte.

5. COMMENT PRENDRE EN COMPTE L'EXPLOITATION DES PRODUITS DERIVES DANS LA DEMARCHE D'EXPLORATION ?

Depuis quelques années, l'exploitation de la géothermie s'accompagne de l'exploitation d'autres produits dans le but d'augmenter le retour sur investissement d'une opération et de rendre ainsi la géothermie plus attractive, son coût d'investissement étant le principal point problématique.

Dans le cas d'un système géothermal profond, le fluide exploité est fortement chargé en divers éléments chimiques provenant des processus d'interaction eau-roche qui ont lieu tout au long de son séjour en profondeur aux contacts des différents types de roche. Ce fluide contient alors des ressources stratégiques comme le lithium, indispensable à la fabrication des batteries depuis celles de nos téléphones portables à celles des véhicules électriques. Plusieurs sites d'exploitation géothermique en Europe montrent des concentrations en Li comprises entre 125 et 480mg/l (Sanjuan *et al.*, 2022). Les procédés d'extraction du Li du fluide géothermal sont en cours de développement et leur mise en place devrait se généraliser dans les prochaines années.

Les fluides géothermaux peuvent également contenir de l'hydrogène naturel susceptible de pouvoir être exploité de manière directe sans passer par l'électrolyse de l'eau, très coûteuse en énergie. L'hydrogène constitue un vecteur énergétique très prometteur pour l'avenir mais pose encore beaucoup de questions en particulier celle de son coût et de son impact carbone lors de sa production. La production d'H₂ naturel totalement décarbonée constitue un challenge de premier plan dans la transition énergétique, mais ces réserves apparaissent très faibles bien que très mal connues.

De façon très prospective et en lien avec la technologie d'exploitation par conduction en monopuits par boucle fermée, la société INTRATERRA développe un concept d'exploitation de matériaux de carrière à partir de puits carottés de très large diamètre (2,4 m) jusqu'à 5 km de profondeur afin d'atteindre des températures autour de 180°C ([smart-geothermie-intraterra/](#)). Cette technologie compte se développer dans les vingt prochaines années afin de produire d'une part des matériaux granitiques avec un impact foncier minimal et de la cogénération de chaleur et d'électricité. Prochainement mise en démonstration dans le sud-ouest du Massif Central, elle permettra l'exploitation écologique de matériaux couplée à celle de la chaleur géothermale.

Il convient donc d'intégrer ces recherches de co-produits dans l'exploration géothermique afin de mutualiser les études préliminaires. Pour les éléments contenus dans le fluide, le Li et l'H₂, il est important de se demander quels sont leurs origines ainsi que les processus de concentration afin de mieux orienter la recherche des zones favorables alliant production géothermique et production de ces ressources stratégiques. Au-delà de la caractérisation du réseau de failles portant les circulations, il s'agira d'approfondir la compréhension de sa mise en place à travers l'histoire géologique en lien avec les processus de concentration des éléments chimiques critiques.

La production de matériaux de carrière demande d'orienter les recherches sur une lithologie de préférence dépourvue de fracturation, afin de faciliter la réalisation du puits et d'extraire un matériau le plus homogène possible. Une étude tectonique régionale, associée à une analyse d'analogues locaux, apportera des informations sur la densité de fracturation et aidera à la détermination de zones propices à ce type d'exploitation.

Conclusions

1. DE LA COMPREHENSION DES RESERVOIRS FRACTURES...

Le cheminement de mes travaux de recherche a eu comme point de départ l'étude du réservoir granitique fracturé EGS de Soultz-sous-Forêts pour l'optimisation de son développement et de son exploitation. A partir de là, mon spectre de travail s'est élargie pour mieux comprendre le système géothermal du Fossé Rhénan dans son ensemble.

La caractérisation des réseaux de fractures dans le socle du Fossé Rhénan montre que ces réseaux sont constitués de zones de failles et de fractures de dimension inférieure, les mésofractures, qui s'organisent de manière hétérogène avec la présence de clusters, zones de densité plus importante. D'origine tectonique, la fracturation observée dans les puits de Soultz peut également être d'origine induite ou latente et apparaître avec la décompression due au forage. Bien que les fractures induites sont directement la conséquence de l'action des contraintes actuelles, les fractures pré-existantes et latentes sont le résultat des états de contrainte passés, liés à l'histoire tectonique de la région depuis la mise en place du granite et avec l'ouverture du graben. Ces fractures s'organisent en plusieurs familles de direction, principalement, :

- N-S à N20°E liées à l'ouverture cénozoïque du graben ;
- NE-SW à NW-SE provenant de la tectonique hercynienne du socle.

Dans le cas du réservoir de Soultz, la matrice granitique constitue une roche imperméable et les circulations du fluide géothermal se font essentiellement dans le réseau de fractures. A partir de l'observation au niveau du puits, il apparaît que moins de 1% des fractures montrent des circulations. Ces fractures drainantes n'ont pas de caractéristiques communes, ni de directions privilégiées : la direction N-S, pourtant majoritaire, n'est pas la direction préférentielle de circulation et les familles NW-SE et NE-SW jouent un rôle majeur dans les circulations au puits.

Au-delà du puits, l'étude des affleurements en surface, pour s'affranchir de la vision restreinte du forage, a montré que les fractures de direction N-S jouent principalement le rôle de recharge du système, en permettant au fluide météoritique d'atteindre les zones profondes du fossé. Les fractures NE-SW à NW-SE seraient alors le siège préférentiel des circulations profondes et transverses au fossé permettant au fluide de se réchauffer et de se charger en éléments chimiques.

Les études à l'échelle régionale ont montré que les fluides pompés à Soultz entrent dans le système par les failles bordières N-S et circulent depuis le nord-est, zone où les formations marines, expliquant la salinité du fluide de Soultz, sont les plus profondes, expliquant leur température d'équilibre.

Durant la mise en place du Fossé Rhénan, les circulations descendantes apparaissent débuter lors des phases précoces de rifting et au moment de la création des failles bordières. Le réchauffement de ces fluides avec la profondeur a permis le démarrage de circulations convectives dans les failles de socle, réactivées lors du rifting. Ces fluides vont altérer les épontes de ces failles augmentant peu à peu leur perméabilité. Ce système va progressivement s'enfoncer avec la subsidence du fossé et perdurer jusqu'à maintenant où il est observé dans les puits de Soultz (Figure 13).

2. ... A L'IDENTIFICATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMALE

Ce travail m'a permis de mieux comprendre un système géothermal du Fossé Rhéna, mais il reste encore des questions en suspens comme l'origine et de rôle des fractures de direction E-W ainsi que l'âge des différentes phases de circulation mises en évidence à partir de l'étude minéralogique des remplissages de fractures.

La compréhension approfondie de ce système permet de mieux définir les zones de concentration des fluides et de la température, et donc d'appréhender en perspective l'exploration géothermale. Ainsi, dans le Fossé Rhéna, la simulation hydro-thermique permettrait de tester différentes hypothèses de fonctionnement du système afin de cibler les zones favorables à exploiter. Bien que la méthodologie de modélisation a pu être développée, la réalité du réseau de failles pris en compte doit être grandement améliorée, de même que la qualification des zones de failles, des fractures et des réseaux en terme de perméabilité.

L'intégration et l'assimilation des données de manière automatisée et moins dépendante des experts est également une voie à développer en prenant en compte les observations des failles et des fractures comme zones potentiellement perméables.

Enfin, les nouveaux concepts d'exploitation de la géothermie, qu'ils soient liés à l'extraction plus systématique de la chaleur ou à de nouvelles formes de design de puits, associée ou non à l'exploitation d'autres produits (Li par exemple), demanderont encore de faire de l'exploration pour mieux caractériser les formations visées, la fracturation devant être un atout ou non pour la réussite de l'opération.

Quel que soit le type de réservoir géothermal profond (Figure 1), les failles et les fractures y jouent un rôle, qui même si il est secondaire (type III et IV) ne doit pas être négligé. L'analyse des réseaux de fractures doit donc se généraliser afin de mieux comprendre les systèmes géothermaux et d'améliorer le succès de leur exploitation.

Bibliographie

- Ahlgren, S.G.**, 2001. The nucleation and evolution of Riedel shear zones as deformation bands in porous sandstone. *Journal of Structural Geology* 23, 1203–1214. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00183-8](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00183-8)
- Anders, M.H., Laubach, S.E., Scholz, C.H.**, 2014. Microfractures: A review. *Journal of Structural Geology* 69, 377–394. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.05.011>
- Armandine, A., Landes, L., Guillon, T., Peter-borie, M., Blaisonneau, A., Rachez, X., Gentier, S.**, 2019. Locating Geothermal Resources : Insights from 3D Stress and Flow Models at the Upper Rhine Graben Scale. *Geofluids* 24. <https://doi.org/10.1155/2019/8494539>
- Baillieux, P., Schill, E., Dezayes, C.**, 2011. 3D structural regional model of the EGS Soultz site (Northern Upper Rhine Graben, France): insights and perspectives, in: PROCEEDINGS, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 31 - February 2, 2011 SGP-TR-191.
- Baujard, C., Genter, A., Dalmis, E., Maurer, V., Hehn, R., Rosillette, R., Vidal, J., Schmittbuhl, J.**, 2017. Hydrothermal characterization of wells GRT-1 and GRT-2 in Rittershoffen, France: Implications on the understanding of natural flow systems in the rhine graben. *Geothermics* 65, 255–268. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.11.001>
- Baumgartner, J., Teza, D., Hettkamp, T., Gandy, T., Schindler, M.**, 2010. Geothermal reservoir development in the Upper Rhine Graben. “Concept, Techniques and Experiences”, the geothermal projects in Landau and Insheim., in: *Second European Geothermal Review*. Presented at the Second European Geothermal Review., Bestec GmbH, Landau, Mainz, Germany.
- Brown, D.W.**, 2000. A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water, in: *Proceedings of the Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University. pp. 233–238.
- Brown, D.W.**, 1995. The US Hot dry Rock program. 20 years of experience in reservoir testing., in: *WGC 1995*. Florence, Italy, p. 26072611.
- Brun, J., Gutscher, M.-A., Teams, D.-E.**, 1992. Deep crustal structure of the Rhine Graben from DEKORP-ECORS seismic reflection data: a summary. *Tectonophysics* 208, 139–147. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90340-C](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90340-C)
- Calcagno, P., Bouchot, V., Thinon, I., Bourguine, B.**, 2012. A new 3D fault model of the Bouillante geothermal province combining onshore and offshore structural knowledge (French West Indies). *Tectonophysics* 526–529, 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.08.012>
- Calcagno, P., Chilès, J.-P., Courrioux, G., Guillen, A.**, 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 171, 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.06.013>

- Cathelineau, M., Boiron, M.-C.**, 2010. Downward penetration and mixing of sedimentary brines and dilute hot waters at 5km depth in the granite basement at Soultz-sous-Forêts (Rhine graben, France). *Comptes Rendus Geoscience* 342, 560–565. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.08.010>
- Celecia, A., Figueiredo, K., Rodriguez, C., Vellasco, M., Maldonado, E., Silva, M.A., Rodrigues, A., Nascimento, R., Ourofino, C.**, 2021. Unsupervised Machine Learning Applied to Seismic Interpretation: Towards an Unsupervised Automated Interpretation Tool. *Sensors* 21, 6347. <https://doi.org/10.3390/s21196347>
- Çiçek, A.**, 2020. The electric power production targeted Unconventional Geothermal Systems (UGS), some conceptual designs and their thermodynamics classification. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 163, 211–228. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.660706>
- Dardji, N., Villemin, T., Rampnoux, J.P.**, 1994. Paleostresses and strike-slip movement: the Cimandiri Fault Zone, West Java, Indonesia. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences* 9, 3–11. [https://doi.org/10.1016/0743-9547\(94\)90061-2](https://doi.org/10.1016/0743-9547(94)90061-2)
- Dezayes, C., Beccaletto, L., Oliviero, G., Baillieux, P., Capar, L., Schill, E.**, 2011. 3-D visualization of a fractured geothermal field: the example of the EGS Soultz site (Northern Upper Thine graben, France), in: *PROCEEDINGS, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford*.
- Dezayes, C., Famin, V., Tourlière, B., Baltassat, J.M., Bénard, B.**, 2022a. Potential areas of interest for the development of geothermal energy in La Réunion Island based on GIS analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 421, 107450. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107450>
- Dezayes, C., Genter, A., Gentier, S.**, 2004. Fracture Network of the EGS Geothermal Reservoir at Soultz-sous-Forêts (Rhine Graben, France), in: *Geothermal Resources Council Transactions*. pp. 213–218.
- Dezayes, C., Genter, A., Thinon, I., Courrioux, G., Tourlière, B.**, 2008a. Assessment of Geothermal Potential of Clastic Reservoirs in the Upper Rhine Graben, in: *3rd International Conference on Ecological Vehicles & Renewable Energies*.
- Dezayes, C., Genter, A., Thinon, I., Courrioux, G., Tourlière, B.**, 2008b. Geothermal potential assessment of clastic triassic reservoirs (Upper Rhine Graben, France), in: *32 Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, USA*.
- Dezayes, C., Genter, A., Valley, B.**, 2010. Structure of the low permeable naturally fractured geothermal reservoir at Soultz. *Comptes Rendus Geoscience* 342, 517–530. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.10.002>
- Dezayes, C., Genter, A., Villemin, T.**, 1996a. Inherited and induced fractures characterized from acoustic and electric borehole images. *Bulletin des Centres de Recherches Elf Exploration Production* 20.
- Dezayes, C., IMAGE SP3 Team**, 2019a. A new geothermal exploration workflow for deep sedimentary basins and basement, in: *EGC 2019. Presented at the European Geothermal Congress, Den Haag, The Netherland*.

- Dezayes, C., Lerouge, C.,** 2019b. Reconstructing Paleofluid Circulation at the Hercynian Basement/Mesozoic Sedimentary Cover Interface in the Upper Rhine Graben. *Geofluids* 2019, 1–30. <https://doi.org/10.1155/2019/4849860>
- Dezayes, C., Lerouge, C., Innocent, C., Lach, P.,** 2021. Structural control on fluid circulation in a graben system: Constraints from the Saint Pierre Bois quarry (Vosges, France). *Journal of Structural Geology* 146, 104323. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104323>
- Dezayes, C., Stopin, A., Wawrzyniak, P., Gal, F., Farlotti, T., Armandine les Landes, A., Calcagno, P., Traineau, H., Hirsinger, L., Serrano, E.M., Chassagne, R.,** 2023. Exploration des potentielles ressources géothermiques profondes de Petite Terre (Mayotte) (Rapport final BRGM/RP-72283-FR). BRGM, Orléans.
- Dezayes, C., Stopin, A., Wawrzyniak, P., Gal, F., Farlotti, T., Calcagno, P., Armandine les Landes, A.,** 2022b. Exploration of the deep geothermal potential of Petite- Terre Island in Mayotte, in: 9th African Rift Geothermal Conference. Djibouti.
- Dezayes, C., Villemain, T., Center, A., Angelier, J.,** 1996b. Origin and significance of relaxation fractures in EPS1 granite core sections (Soultz-sous-Forets, Rhinegraben). *Comptes Rendus de l'Academie de Sciences - Serie IIa: Sciences de la Terre et des Planetes* 323.
- Dezayes, C., Villemain, T., Genter, A., Traineau, H., Angelier, J.,** 1995. Analysis of fractures in boreholes of the Hot Dry Rock project at Soultz-sous-Forêts (Rhine graben, France). *Scientific Drilling* 5, 31–41.
- Dezayes, C., Villemain, T., Pêcher, A.,** 2000. Microfracture pattern compared to core-scale fractures in the borehole of Soultz-sous-Forets granite, Rhine graben, France. *Journal of Structural Geology* 22. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00003-1)
- Dixon, R.J., Moore, J.K.S., Bourne, M., Dunn, E., Haig, D.B., Hossack, J., Roberts, N., Parsons, T., Simmons, C.J.,** 2010. Integrated petroleum systems and play fairway analysis in a complex Palaeozoic basin: Ghadames-Illizi Basin, North Africa. *Petroleum Geology Conference Proceedings* 7, 735–760. <https://doi.org/10.1144/0070735>
- Fallah, A.H., Gu, Q., Chen, D., Ashok, P., van Oort, E.,** 2021. Globally scalable geothermal energy production through managed pressure operation control of deep closed-loop well systems. *Energy Conversion and Management* 236, 114056. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114056>
- Fouillac, C., Sanjuan, B., Gentier, S., Czernichowski-Lauriol, I.,** 2004. Could sequestration of CO₂ be combined with the development of enhanced geothermal systems, in: Third Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration, Alexandria, VA.
- Gehring, M., Loksha, V.,** 2012. Geothermal handbook: planning and financing power generation (Report). ESMAP.
- Genter, A., Castaing, C., Dezayes, C., Tenzer, H., Traineau, H., Villemain, T.,** 1997. Comparative analysis of direct (core) and indirect (borehole imaging tools) collection of fracture data in the Hot Dry Rock Soultz reservoir (France). *Journal of Geophysical Research* 102, 15419. <https://doi.org/10.1029/97JB00626>

- Genter, A., Traineau, H., Dezayes, C., Elsass, P., Ledésert, B., Meunier, A., Villemin, T.,** 1995. Fracture analysis and reservoir characterization of the granitic basement in the HDR Soutz project (France). *Geothermal Science and Technique* 4, 189–214.
- Genter, A., Traineau, H., Ledésert, B., Bourgine, B., Gentier, S.,** 2000. Over 10 years of geological investigations within the HDR Soutz project, France, in: *World Geothermal Congress*. Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 3707–3712.
- Gentier, S., Rachez, X., Dezayes, C., Blaisonneau, A., Genter, A.,** 2005. How to understand the effect of the hydraulic stimulation in terms of hydro-mechanical behavior at Soutz-sous-Forêts (France), in: *Transactions - Geothermal Resources Council*.
- Gentier, S., Rachez, X., Peter-borie, M., Loubaud, M.,** 2014. A flow model of the deep geothermal reservoir of Soutz-sous-Forêts (France), in: *ARMA American Rock Mechanics Association* 13-279. San Francisco.
- Gentier, S., Rachez, X., Tran Ngoc, T.D., Souque, C.,** 2010. 3D Flow Modelling of the Medium-Term Circulation Test Performed in the Deep Geothermal Site of Soutz-Sous-forêts (France), in: *Proceeding World Geothermal Congress 2010*. Bali, Indonesia, pp. 25–29.
- GEORG,** 2013. Potentiel géologique profond du Fossé rhénan supérieur - Partie 1: synthèse. (Rapport final RP-61945-FR). BRGM.
- GeORG, E. du projet,** 2014. Potentiel géologique profond du Fossé Rhenan supérieur - Partie 2: géologie et potentiel (Report final). INTERREG IV.
- Gérard, A., Kappelmeyer, O.,** 1987. The Soutz-sous-Forêts project. *Geothermics* 16, 393–399.
- Hamm, V., Lopez, S., Gille, A.-L.,** 2016. Projet de recherche ORBOU: 2. Travaux de modélisation associés à la réinjection partielle des fluides de production de la centrale géothermique de Bouillante, en Guadeloupe (2014-2016), Rapport BRGM/RP-65939-FR. BRGM/RP-65939-FR. <https://doi.org/10.3406/ridc.1989.1865>
- Harvey, C., Beardsmore, G., Moeck, I., Rüter, H., Bauer, S.,** 2014. Best practices guide for géothermal exploration, IGA Service GmbH. Bochum University of Applied Sciences, Bochum.
- Hooijkaas, G.R., Genter, A., Dezayes, C.,** 2006. Deep-seated geology of the granite intrusions at the Soutz EGS site based on data from 5 km-deep boreholes. *Geothermics* 35, 484–506.
- Katz, Y., Weinberger, R., Aydin, A.,** 2004. Geometry and kinematic evolution of Riedel shear structures, Capitol Reef National Park, Utah. *Journal of Structural Geology* 26, 491–501. <https://doi.org/10.1016/J.JSG.2003.08.003>
- Kervevan, C., Beddelem, M., O'Neil, K.,** 2014. CO₂-DISSOLVED: a Novel Concept Coupling Geological Storage of Dissolved CO₂ and Geothermal Heat Recovery Part 1: Assessment of the Integration of an Innovative Low-cost, Waterbased CO₂ Capture Technology, in: Dixon, T., Herzog, H., Twinning, S. (Eds.), . pp. 4508–4518. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.485>

- Kushnir, A.R.L., Heap, M.J., Baud, P.**, 2018. Assessing the role of fractures on the permeability of the Permo-Triassic sandstones at the Soultz-sous-Forêts (France) geothermal site. *Geothermics* 74, 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.03.009>
- Lautze, N., Thomas, D., Waller, D., Frazer, N., Hinz, N., Apuzen-Ito, G.**, 2017. Play fairway analysis of geothermal resources across the state of Hawaii: 3. Use of development viability criterion to prioritize future exploration targets. *Geothermics* 70, 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.07.005>
- Le Carlier, C., Royer, J.-J., Flores, E.L.**, 1994. Convective heat transfer at the Soultz-sous-Forêts Geothermal Site: implications for oil potential. *First Break* 12, 553–560. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.1994033>
- Lindsey, C.R., Ayling, B.F., Asato, G., Seggiaro, R., Carrizo, N., Larcher, N., Marquetti, C., Naón, V., Serra, A.C., Faulds, J.E., Coolbaugh, M.F.**, 2021. Play fairway analysis for geothermal exploration in north-western Argentina. *Geothermics* 95, 102128. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102128>
- Lopez, S., Hamm, V., Le, M., Schaper, L., Boissier, F., Cotiche, C., Giuglaris, E.**, 2010. Geothermics 40 years of Dogger aquifer management in Ile-de-France , Paris Basin , France. *Geothermics* 39, 339–356. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.09.005>
- Lopez, S., Masson, R., Xing, F., Beau de, L., Birgler, N., Smay, F., Brenner, K., Kern, M., Courrioux, G., Caritg, S., Labeau, Y.**, 2018. Geothermal Modeling in Complex Geological Systems with the ComPASS Code, in: PROCEEDINGS, 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Presented at the 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Massart, B., Paillet, M., Henrion, V., Sausse, J., Dezayes, C., Genter, A., Bisset, A.**, 2010. Fracture Characterization and Stochastic Modeling of the Granitic Basement in the HDR Soultz Project (France), in: World Geothermal Conference. pp. 1–7.
- Moeck, I.S.**, 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37, 867–882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>
- Moraga, J., Duzgun, H.S., Cavur, M., Soydan, H.**, 2022. The Geothermal Artificial Intelligence for geothermal exploration. *Renewable Energy* 192, 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.113>
- Mordensky, S.P., Lipor, J.J., DeAngelo, J., Burns, E.R., Lindsey, C.R.**, 2023. When less is more: How increasing the complexity of machine learning strategies for geothermal energy assessments may not lead toward better estimates. *Geothermics* 110, 102662. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102662>
- Muffler, P., Cataldi, R.**, 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics* 7, 53–89. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(78\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(78)90002-0)
- Nelson, R.A.**, 2001. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs, 2nd ed. ed. Gulf Professional Pub, Boston.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H., Tanaka, T.**, 2008. GIS integration model for geothermal exploration and well siting. *Geothermics* 37, 107–131. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2007.12.001>

- Parker, R.**, 1999. The Rosemanowes HDR projet 1983-1991. *Geothermics* 28, 603–615. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00031-0)
- Peacock, D.C.P., Nixon, C.W., Rotevatn, A., Sanderson, D.J., Zuluaga, L.F.**, 2016. Glossary of fault and other fracture networks. *Journal of Structural Geology* 92, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.09.008>
- Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J.**, 2018. Structural analyses and fracture network characterisation: Seven pillars of wisdom. *Earth-Science Reviews* 184, 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.006>
- Place, J., Diraison, M., Naville, C., Géraud, Y., Schaming, M., Dezayes, C.**, 2010. Decoupling of deformation in the Upper Rhine Graben sediments. Seismic reflection and diffraction on 3-component Vertical Seismic Profiling (Soulz-sous-Forêts area). *Comptes Rendus - Geoscience* 342, 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.06.006>
- Potter, R., Robinson, E., Smith, M.**, 1974. Method of extracting heat from dry geothermal reservoirs. U.S. Patent.
- Pribnow, D., Schellschmidt, R.**, 2000. Thermal tracking of the upper crustal fluid flow in the Rhine Graben. *Geophysical research Letter* 27, 1957–1960.
- Prol-Ledesma, R.M.**, 2000. Evaluation of the reconnaissance results in geothermal exploration using GIS. *Geothermics* 29, 83–103. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00051-6)
- Pruess, K.**, 2006. Enhanced geothermal systems (EGS) using CO₂ as working fluid—A novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon. *Geothermics* 35, 351–367. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2006.08.002>
- Rachez, X., Gentier, S.**, 2010. 3D-hydromechanical Behavior of a Stimulated Fractured Rock Mass, in: *Proceedings World Geothermal Congress*. Presented at the World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010, pp. 1–8.
- Robertson-Tait, A.**, 2013. Conceptual Modeling: Data Integration and Presentation. Presented at the Geothermal Exploratory Best Practices Launch Event, Istanbul.
- Rotstein, Y., Edel, J.-B., Gabriel, G., Boulanger, D., Schaming, M., Munsch, M.**, 2006. Insight into the structure of the Upper Rhine Graben and its basement from a new compilation of Bouguer Gravity. *Tectonophysics* 425, 55–70. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.07.002>
- Sanjuan, B., Gourcerol, B., Millot, R., Rettenmaier, D., Jeandel, E., Rombaut, A.**, 2022. Lithium-rich geothermal brines in Europe: An up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources. *Geothermics* 101. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102385>
- Sanjuan, B., Millot, R., Innocent, C., Dezayes, C., Scheiber, J., Brach, M.**, 2016. Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation. *Chemical Geology* 428, 27–47. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.02.021>
- Sausse, J., Dezayes, C., Dorbath, L., Genter, A., Place, J.**, 2010. 3D model of fracture zones at Soulz-sous-Forêts based on geological data, image logs, induced microseismicity and

vertical seismic profiles. *Comptes Rendus Geoscience* 342, 531–545.
<https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.01.011>

- Shiozawa, S., McClure, M., Keeton, E.D.**, 2014. EGS Designs with Horizontal Wells , Multiple Stages , and Proppant. 39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University 1–13.
- Toews, M., Holmes, M.**, 2021. Eavor-lite performance update and extrapolation to commercial projects. *Transactions - Geothermal Resources Council* 45, 86–103.
- Traineau, H., Sanjuan, B., Brach, M., Audru, J.C.**, 2006. Etat des connaissances du potentiel géothermique de Mayotte. BRGM/RP-54700-FR.
- Trice, R., Hiorth, C., Holdsworth, R.**, 2022. Fractured basement play development on the UK and Norwegian rifted margins. *SP* 495, 73–97. <https://doi.org/10.1144/SP495-2018-174>
- Trumpy, E., Donato, A., Gianelli, G., Gola, G., Minissale, A., Montanari, D., Santilano, A., Manzella, A.**, 2015. Data integration and favourability maps for exploring geothermal systems in Sicily, southern Italy. *Geothermics* 56, 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.03.004>
- Ungemach, P., Antics, M., Davaux, M.**, 2019. Subhorizontal well architecture and geosteering navigation enhance well performance and reservoir evaluation A field validation, in: *PROCEEDINGS, 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Presented at the 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, USA, pp. 1–18.
- Valley, B.**, 2007. The relation between natural fracturing and stress heterogeneities in deep-seated crystalline rocks at Soultz-sous-Forêts (France) (Thesis). ETH Zürich, Zürich.
- Valley, B., Evans, K.F.**, 2006. Stress state at soultz-sous-Forêts to 5km depth from wellbore failure and hydraulic observations. Presented at the EHDRA Meeting, Soultz-sous-Forêts.
- Villemin, T., Bergerat, F.**, 1987. L'évolution structurale du fossé rhénan au cours du Cénozoïque: un bilan de la déformation et des effets thermiques de l'extension. *Bull. Soc. géol. France* III, 245–255.
- Yousefi, H., Noorollahi, Y., Ehara, S., Itoi, R., Yousefi, A., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Sasaki, K.**, 2010. Developing the geothermal resources map of Iran. *Geothermics* 39, 140–151.
<https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2009.11.001>
- Zingg, O., Meier, P.**, 2019. Summary of the investigations conducted following the November 2017 earthquake in Pohang, South Korea, and implications for the Haute-Sorne multi-stage-stimulation EGS project, Switzerland. *Transactions - Geothermal Resources Council* 43, 525–538.

Comprendre les réservoirs fracturés pour mieux identifier la ressource géothermale

Ce travail d'HDR analyse l'apport de l'étude des réseaux de failles et de fractures à la compréhension des réservoirs géothermaux profonds.

Cela passe dans un premier temps par une meilleure caractérisation du réseau de fractures afin de comprendre sa mise en place et son rôle dans le socle cristallin du Fossé Rhéno. Ces travaux montrent que ce réseau de fractures est constitué de zones de failles, qui structurent le réseau, et des mésofractures, qui affectent le massif de manière dense. Ces fractures, issues de la tectonique hercynienne et du rifting, s'organisent en cluster de densité hétérogène

Dans un deuxième temps, le développement de la représentation en 3 dimensions de ces réseaux de fractures a permis, à l'échelle du puits, de corréler les failles et, à l'échelle régionale, d'obtenir une vision globale du sous-sol et de permettre le calcul volumique de la chaleur en place d'une formation.

Ces travaux convergent vers l'étude des circulations profondes des fluides géothermaux dans le réservoir fracturé de Soultz et dans le système géothermal du Fossé Rhéno. Il est montré que les écoulements se font dans un nombre restreint de failles et mésofractures dont celles mises en place lors de la tectonique hercynienne jouent un rôle majeur.

L'importance du rôle des failles et fractures est mis en perspective dans l'exploration de tous types de systèmes géothermaux. Il est alors essentiel de développer une recherche sur la fracturation dans un but d'exploration ainsi qu'une approche intégrée et la plus quantitative possible en lien avec les nouvelles méthodes d'exploitation de la géothermie profonde, mais également les ressources minérales associées.

