La géothermie profonde EGS: Place de la mécanique des roches

S. Gentier

Direction de la Stratégie, de la Recherche et de l'Evaluation

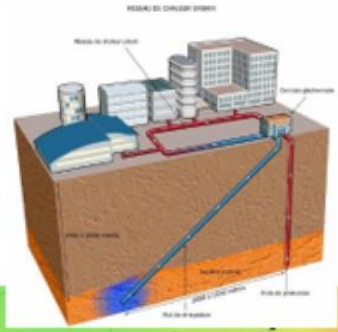
Géosciences pour une Terre durable
brgm

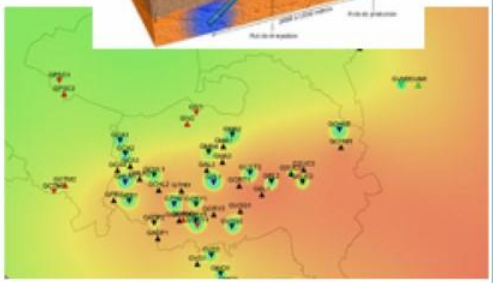
La géothermie profonde

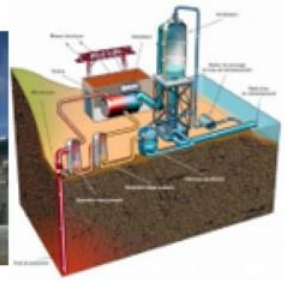
> Recouvre à l'heure actuelle la production d'électricité mais aussi la production de chaleur aussi bien industrielle qu'« urbaine »

> En d'autres termes cela recouvre:

- La géothermie « conventionnelle » caractérisée par des milieux géologiquement favorables:
  - Milieux poreux, perméables : sédimentaires à volcano-sédimentaires
  - Présence d'un fluide naturel : **réservoir**
  - Températures adaptées à l'exploitation recherchée
- La géothermie non conventionnelle :
  - Des Hot Dry Rocks (HDR) aux EGS (Engineered Geothermal Systems)
  - Les systèmes sédimentaires « géo-pressurisés »
  - Les réservoirs sédimentaires profonds chauds



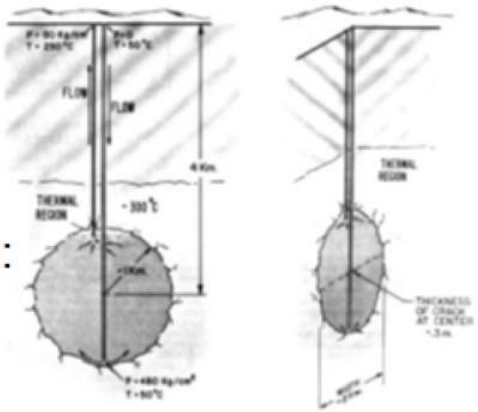




Des Hot Dry Rocks (HDR) aux Engineered Geothermal Systems (EGS)

> Les années 70 :

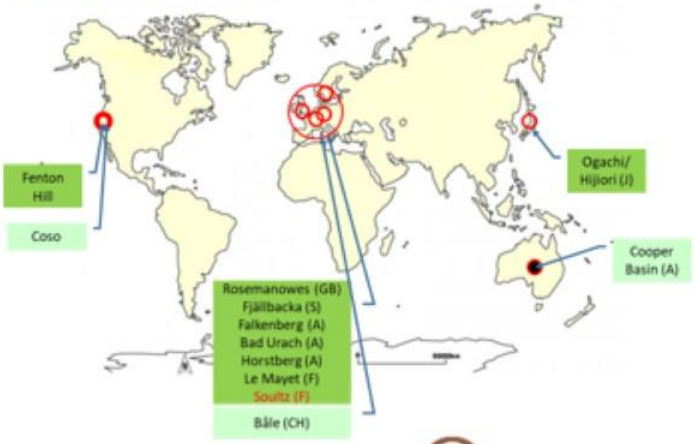
- Un choc pétrolier
- Un concept proposé par B. Potter (LANL-USA) : créer un échangeur artificiellement par fracturation hydraulique dans un milieu rocheux chaud et sec pour produire de l'électricité :
  - Un concept purement « physique »



Originally proposed concept for a Hot Dry Rock geothermal energy system (d'après EERE Information Center, 2010)

> Des sites expérimentaux dans le monde :

- Fentoll Hill (Nouveau Mexique, USA)
- Rosemanowes (Cornouaille, GB)
- Le Mayet de Montagne (Allier, France)
- Fjällbacka (Suède),
- Falkenberg, Urach (Allemagne)
- Soultz-sous-Forêts (Alsace, France)
- *Ogachi/Hijiori (Japon)*
- *Habanero (Australie)…*

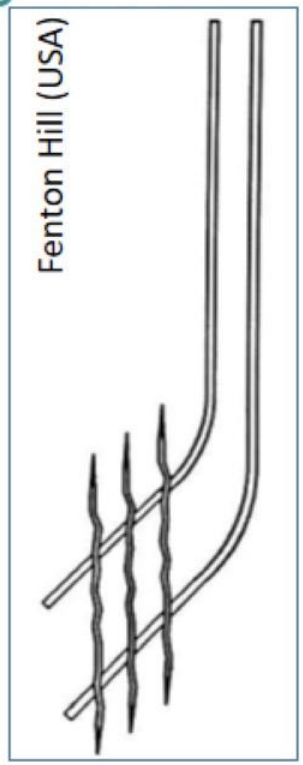


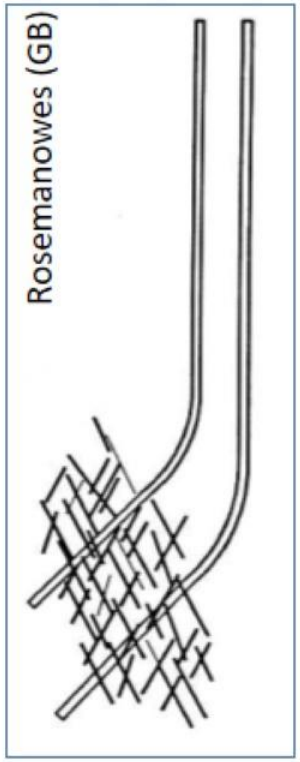
Géosciences pour une Terre durable
brgm

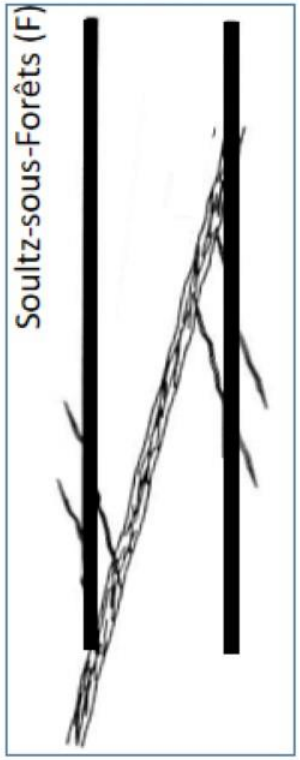
De Fenton Hill à Soultz-sous-Forêts : des schémas différents

Première application de la fracturation hydraulique dans milieu cristallin

Pas de « penny shape » .. Ruptures selon Joints/ fractures préexistants







Stimulation de grands volume

Pompage dans puits production

Limitation de la propagation du nuage micro-sismique à la phase de stimulation

Mise en pression pour maintenir les joints ouverts

Propagation de l'échangeur en fonction des structures naturelles

Pertes de fluide conséquentes

Courts circuits…

Amélioration irréversible de l'injectivité / productivité

Auto soutènement des fractures

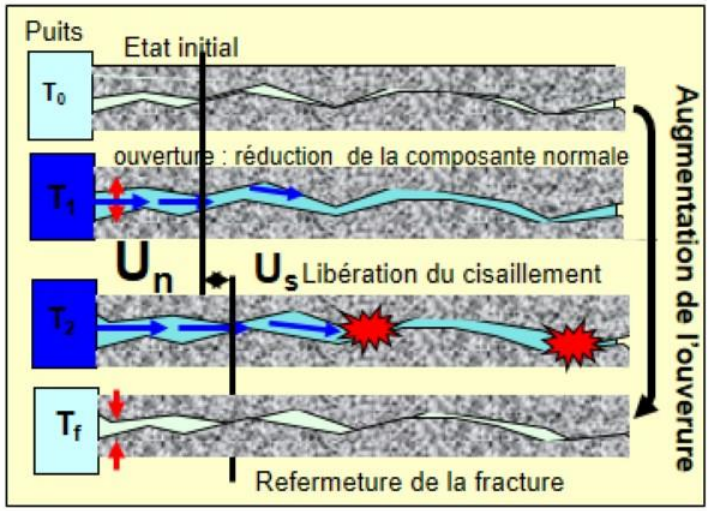
Ruptures en cisaillement….

brgm Géosciences pour une Terre durable

La stimulation hydraulique : des mécanismes complexes

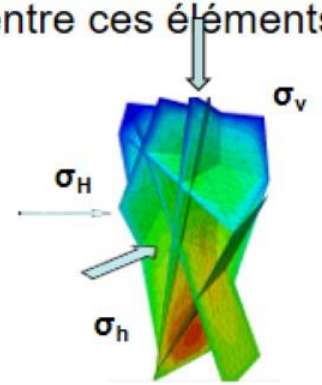
> **Au niveau des failles, des mécanismes de cisaillement qui :**

- provoquent une dilatance
- induisent une augmentation irréversible de la perméabilité fonction de:
  - son orientation par rapport à l'état de contrainte
  - Sa position dans le puits
  - Son ouverture et perméabilité initiale voire la nature de son environnement (TM)

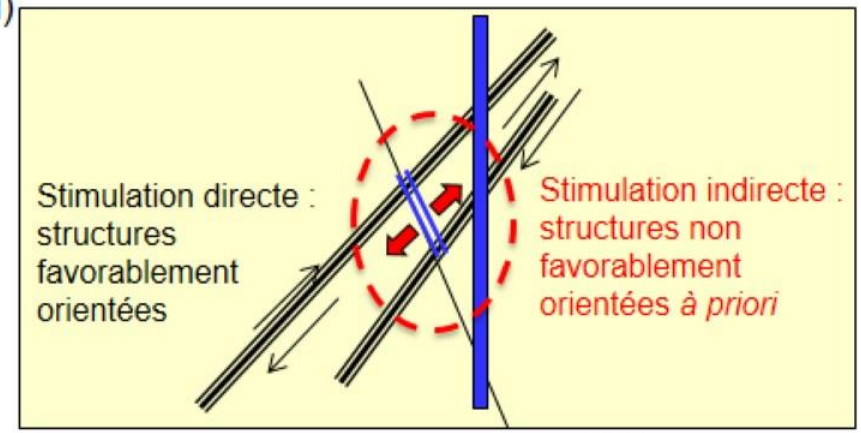


> **Au niveau du réseau de failles :**

- rôle du schéma structural et des intersections entre ces éléments conducteurs



A partir de modèles (T)HM…



Cf. travaux F.H. Cornet , D. Bruel…

brgm Géosciences pour une Terre durable

Mais une micro-séismicité associée

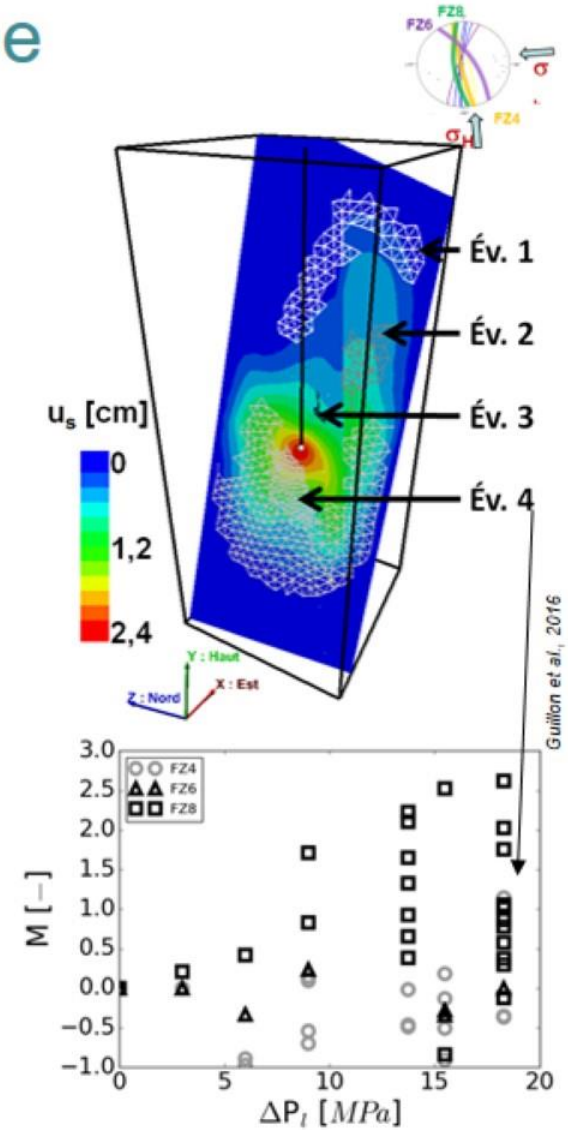
> **Très nombreux événements micro-sismiques de très faible magnitude : inhérent à la méthode – ruptures en cisaillement**
  - reproduire le nuage ?

> **Très rares événements micro-sismiques «problématiques» (>2?)**

> **Résultats / questions :**
  - Lien entre déplacement en cisaillement dans les plans et la chute de contrainte (relaxation locale)
  - Loi de comportement?
  - Glissements sismique / asismique ?
  - Rôle du degré de connectivité du réseau de faille ?

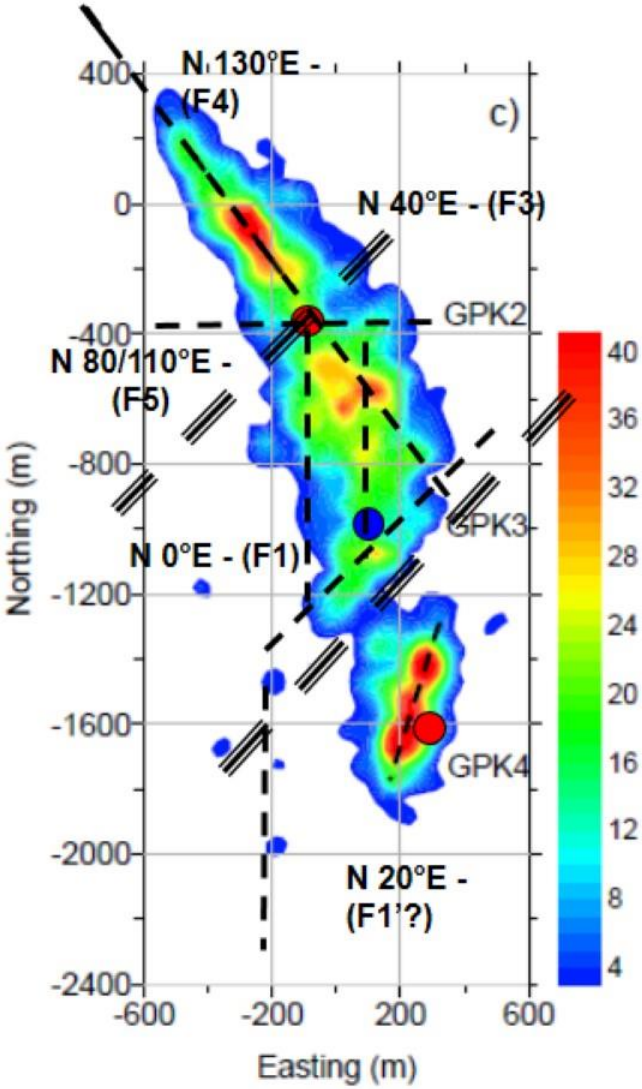
Cf. travaux F.H. Cornet , J. Schmitbull…

> **Réduire voire éliminer ces événements « problématiques » tout en gardant l'augmentation irréversible de la perméabilité : un défi !**

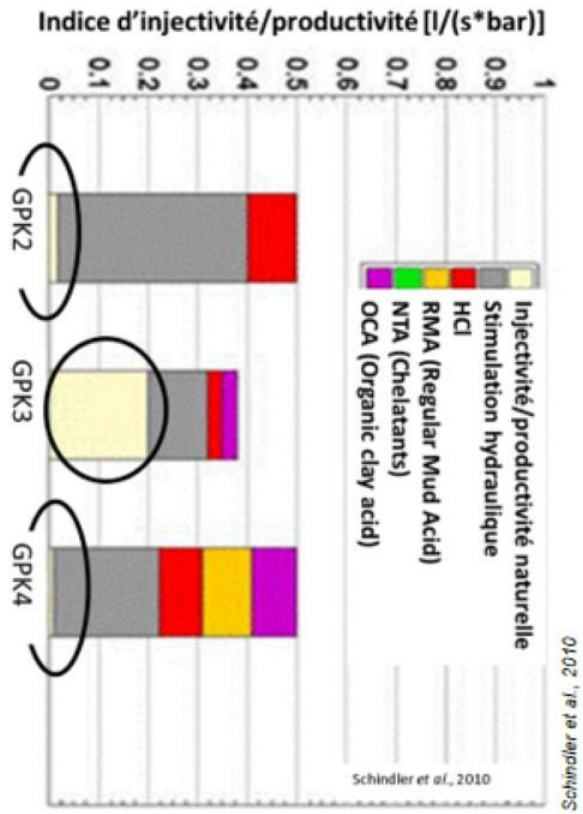


50ème anniversaire CFMR

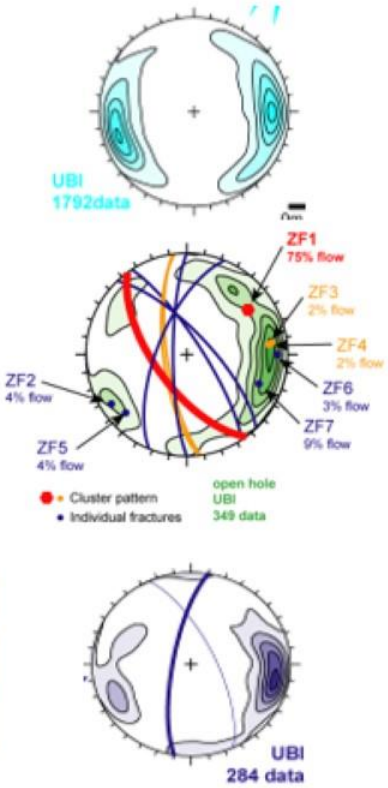
Et un aléa « géologique » : effet local sur les puits



D'après Tishner et al., 2010



Schindler et al., 2010

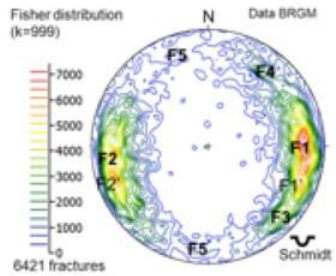


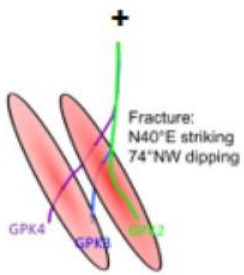
Dezayes et al., 2004

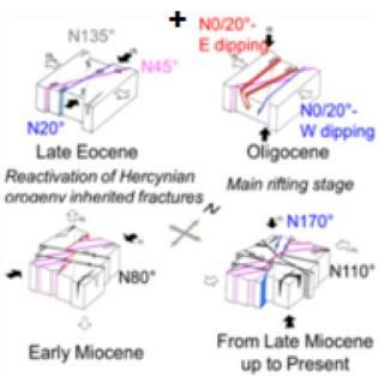
Des résultats variables d'un puit à l'autre

brgm Géosciences pour une Terre durable

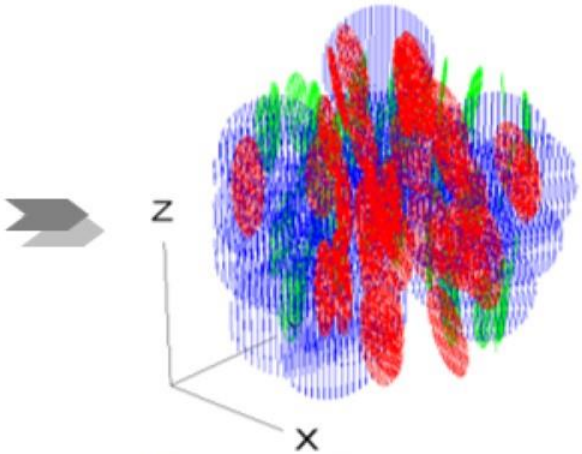
Et un aléa « géologique » : effet sur la connectivité



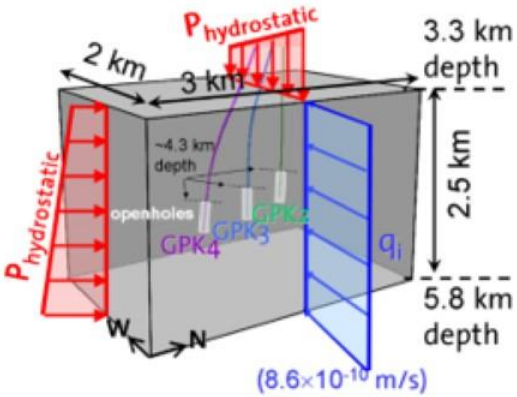




Génération des disques



Génération des chenaux

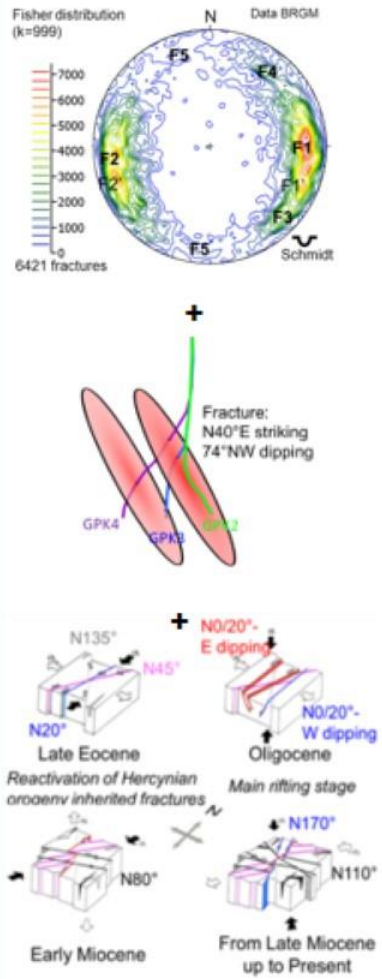


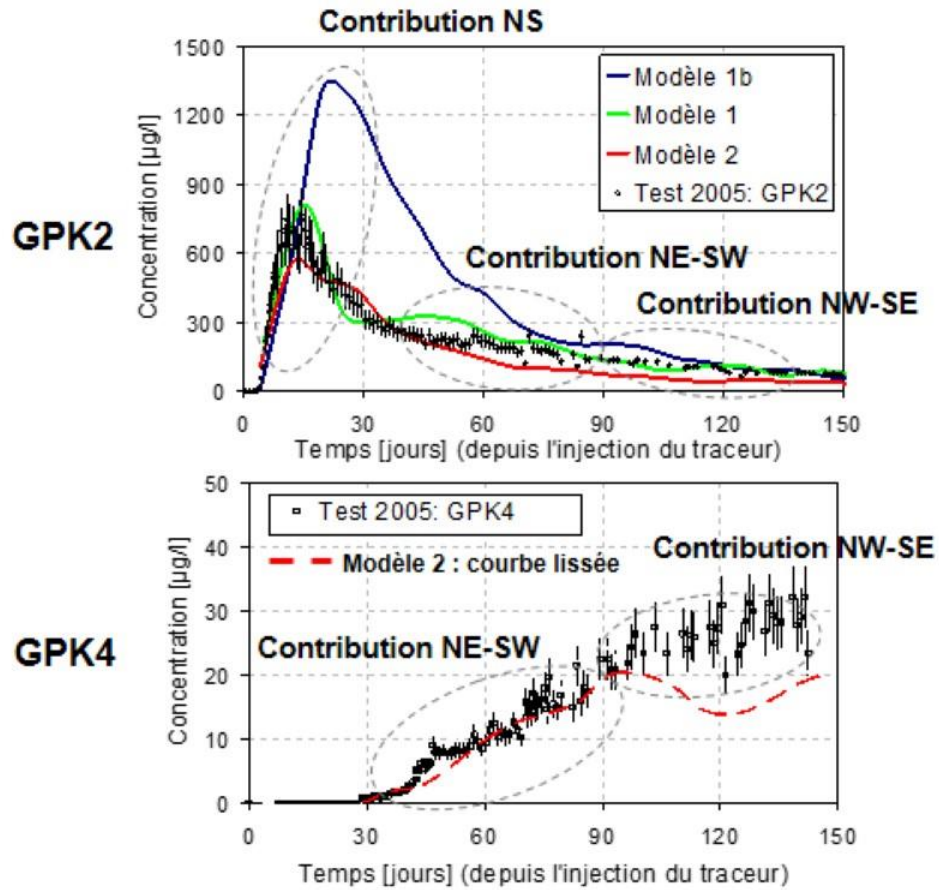
Conditions aux limites

+ Etude probabiliste *(Peter et al., 2013)*

50ème anniversaire CFMR

Et un aléa « géologique » : effet sur la connectivité





(Gentier et al., 2012)

+ Etude probabiliste (Peter et al., 2013)

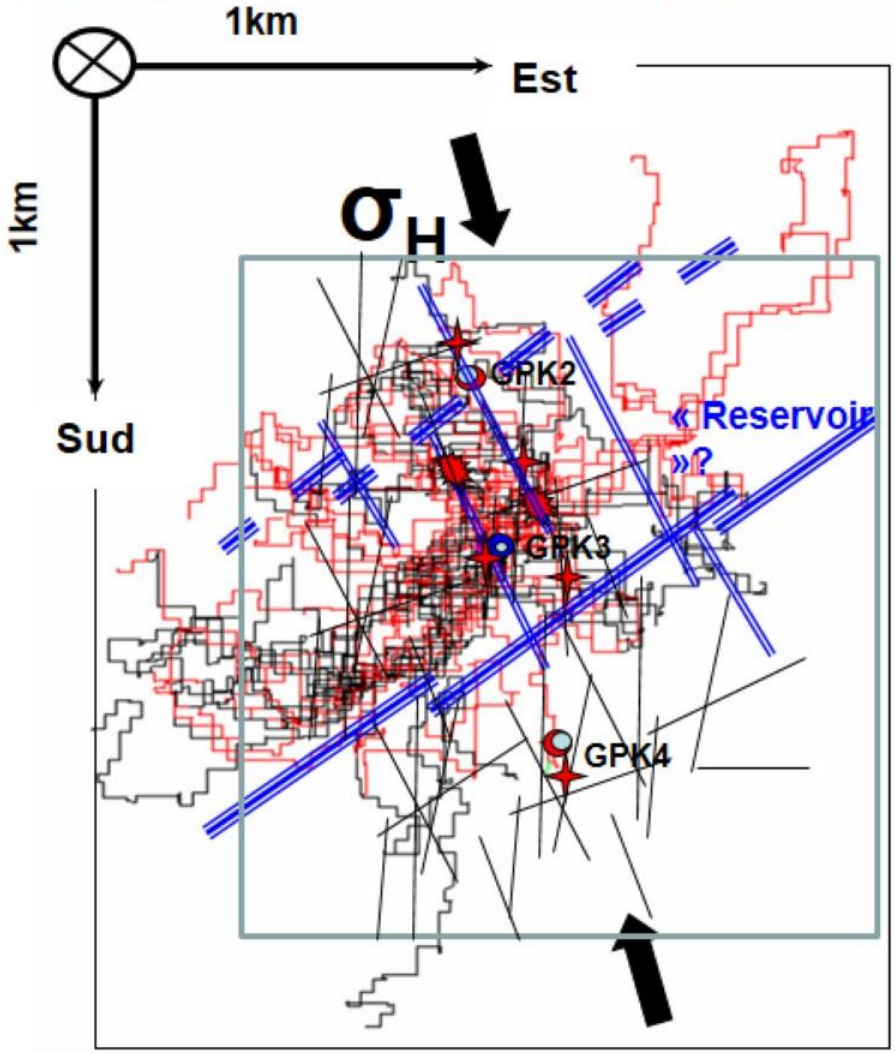
50ème anniversaire CFMR

Vers des échangeurs branchés sur des « failles réservoirs » : une proposition de modèle conceptuel?

Des structures anté-rift relativement perméables peu sensibles aux contraintes actuelles pour certaines qui constituent:
- des « réservoirs »
- Mais aussi une limite à l'effet des stimulations

Des structures plus récentes ou réactivées dans une orientation favorables par rapport aux contraintes actuelles qui favorisent potentiellement :
- la stimulation
- L'accès aux« réservoirs »

Pas de perte mais un recyclage de 20 à 30% entre les puits bien connectés



brgm Géosciences pour une Terre durable

Des effets thermiques… encore mal connus mais manifestes

> **Au puits et proche puits:**

Bérard et Cornet, 2003)

- Existence de « breakouts » thermiques
- A distinguer des « breakouts » mécaniques

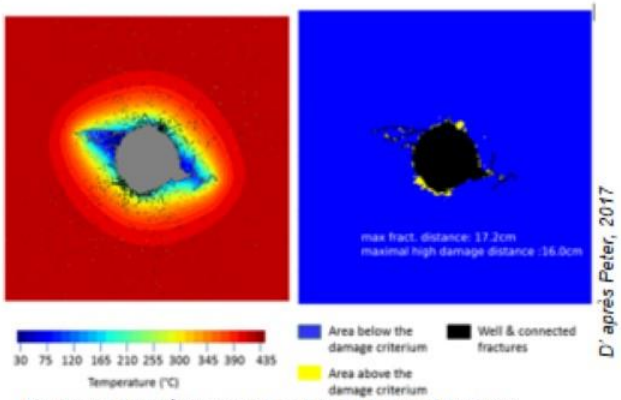
> **A distance du puits et avec le temps :**

Kayd et Bruel (2014)

- Changement des chemins de circulation entre les puits (test de circulation 1997)
- Risque de court-circuits (Rosemanowes)
- Impact sur la sismicité induite

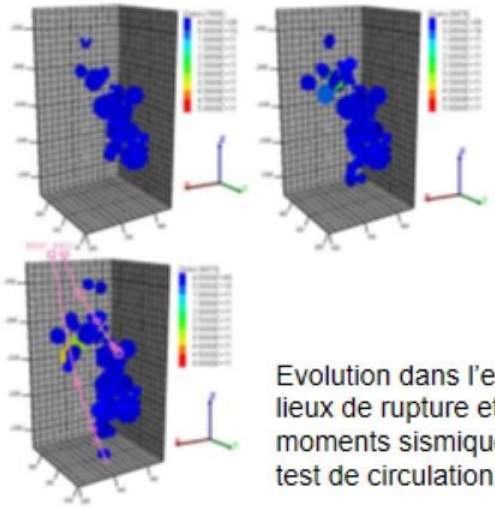
> **Un enjeu majeur :**

- pérennité du système



D' après Peter, 2017

Ruptures simulées (points noirs) au cours des deux premières heures dans le voisinage d'un forage à une profondeur de 4700 m lors du refroidissement lent dans le contexte islandais (modèle particulaire)

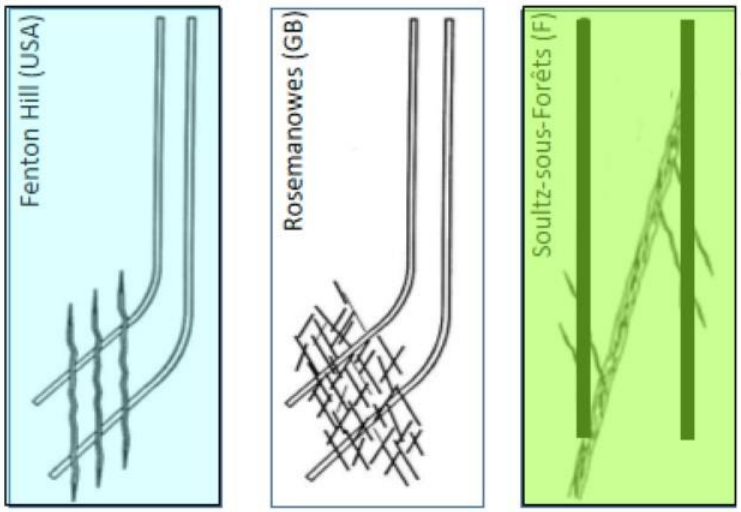


(Kayad Houssa, 2013).

Evolution dans l'espace des lieux de rupture et des moments sismiques durant le test de circulation

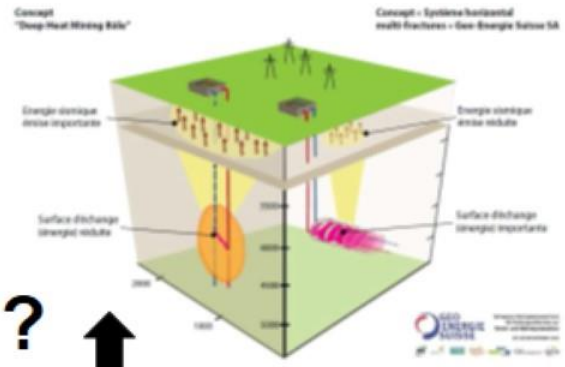
Cf. Chapitre dans livre « Thermomécanique des roches », à paraître

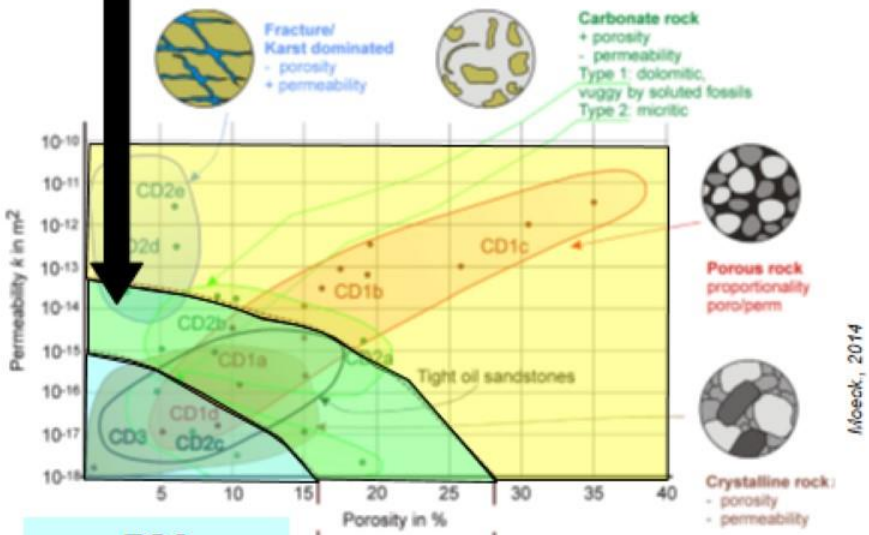
Une évolution du concept initial…



Soultz (F)

Groß Schönebeck (A)





EGS pétrothermaux

EGS hydrothermaux

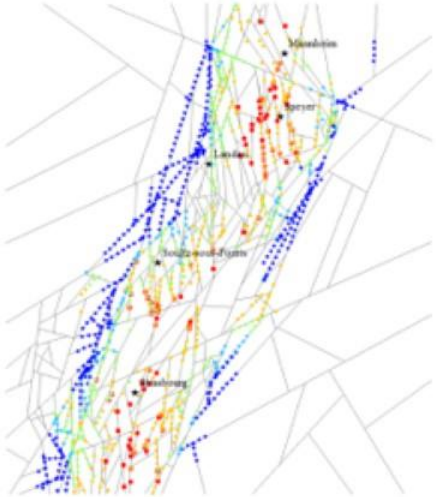
Systèmes hydrothermaux

O&G ?

?

Cf. Présentation J. Desroches

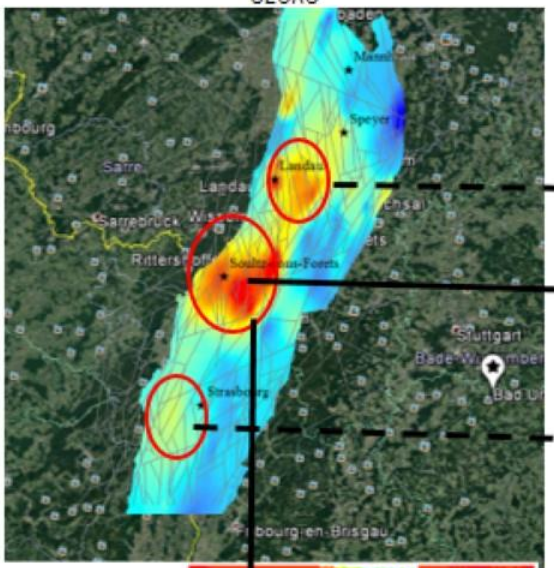
Les suites de Soultz-sous-Fôrêts : l'Alsace



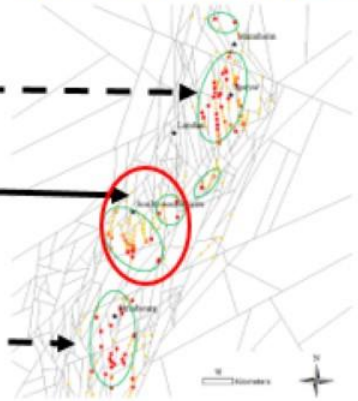
Armandines Les Landes et al., 2017

Localisation des particules à une profondeur de 2 km

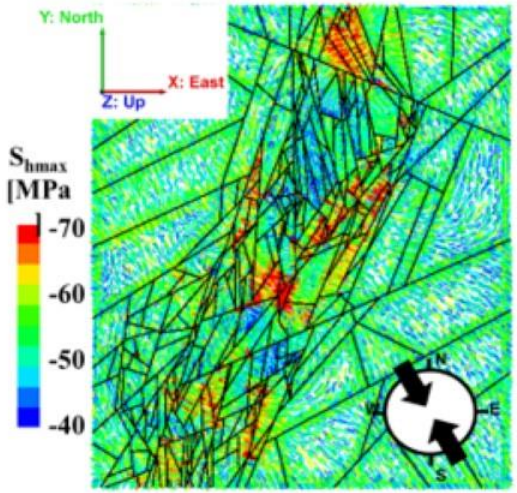
GEORG



Localisation des particules ayant dépassées 2 km de profondeur, parcourues les chemins les plus longs et zones présentant les plus fortes concentrations de ces particules

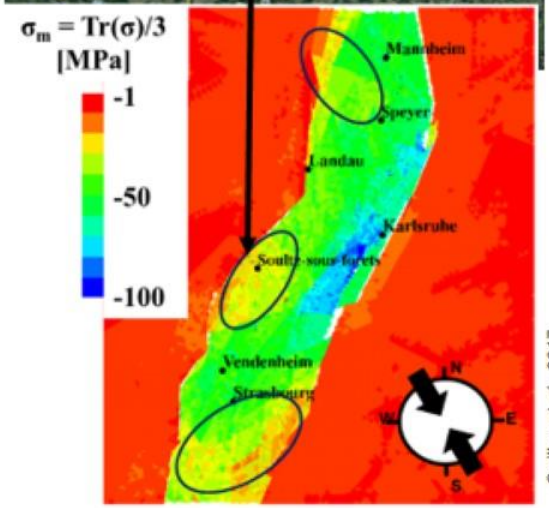


Armandines Les Landes et al., 2017



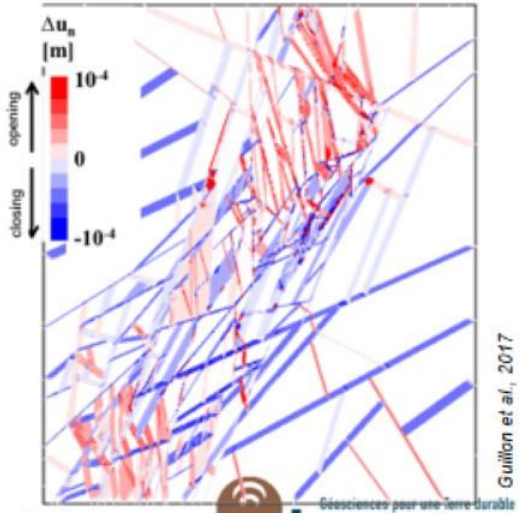
Guillon et al., 2017

Carte de la contrainte horizontale majeure (4,5 km)



Guillon et al., 2017

Contrainte moyenne (toit du socle)



Guillon et al., 2017

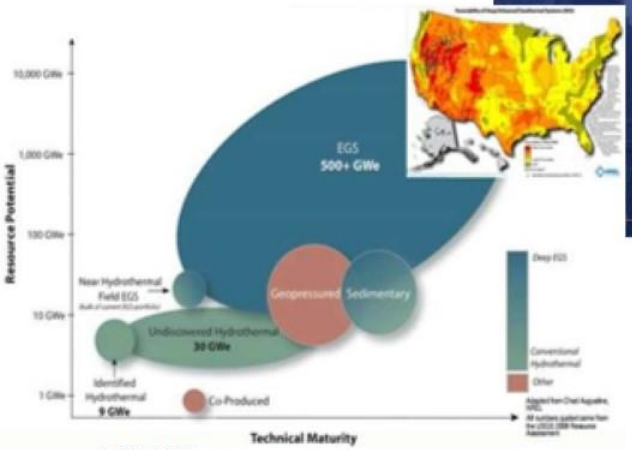
Carte des ouvertures des failles (4,5 km)

brgm

50ème anniversaire CFMR

Quelles perspectives pour les EGS ?

Des projets dans le monde entier…



DOE, 2014

Un intérêt énergétique certain …

Quelles perspectives pour les EGS ?

Les EGS :
Vers une exploitation « généralisée » de la chaleur profonde :
- En tant que tels : chaleur et/ou électricité
- En compléments à l'exploitation géothermique « conventionnelle » : « *in/near* fields »

Les EGS :
Plus un ensemble de technologies et connaissances à adapter au sous-sol…
Que des contextes géologiques spécifiques prédéfinis :
Enginereed Géothermal Systems

Les EGS :
- Développement des puits et de l'échangeur:
  - Les stimulations (hydraulique, chimique,thermique…)
  - Multidrains, Multi-conduits
  - Fluide calorporteur (CO2…)
- Pérennité des systèmes (refroidissement, court-circuit…
- Risques associés (microseismicité….)

Les EGS :
Mais une prise en compte indispensable de connaissances spécifiques au sous-sol :
- Hydraulique souterraine et thermique « souterraine » (gradients, flux thermiques),
- Géologie (structurale, tectonique…)

Les EGS :
R&D en mécanique des roches et couplages associés indispensables aux différentes échelles de temps (stimulation, pérennité) et d'espace (exploration, puits, massif):
- Lois de comportement
- Détermination états de contrainte
- Modélisation

En France : Une aventure de bout en bout !

Du Mayet…

F.H. Cornet

A l'époque, une opération d'injection de sable (2 bacs de gel 50cp de 2x100m3) pour maintenir les fractures ouvertes. Finalement ça s'est fait tout seul : cisaillement !

2 forages sub verticaux distants de 100 m, non alignes avec σHmax fores par Massé (la foreuse) en 1984 et 1986, prof 780 et 840 m, granite, trous ouverts développés par frac hydrauliques.

3 forages avec parties ouvertes sub verticales distantes de 700 m, alignés avec σHmax, forés entre 1989 et 2003, prof 5 000 m, granite, trous ouverts développés par stimulation hydraulique.

A. Gérard

Les années 2000 : un site pilote unique au monde relié au réseau électrique en 2008

2016 : une centrale de production électrique industrielle

…A Soultz

brgm — Géosciences pour une Terre durable