la géothermie profonde à Strasbourg

contextes technique et géologique

Thierry de Larochelambert
Professeur associé à l'Institut Femto-ST
CNRS-UMR6174, Département Énergie
Chaire Supérieure de Physique-Chimie
Docteur en Énergétique
courriel : thierry.de-larochelambert@femto-st.fr

présentation

1. introduction
2. la géothermie profonde : retours d’expérience
3. analyse comparée du projet GeoVen
4. des questions en suspens

définitions et mesures en géologie

- **unités d'énergie et de puissance**

préfixes:

k (kilo) ≡ 10^3
M (méga) ≡ 10^6
G (giga) ≡ 10^9
T (téra) ≡ 10^{12}
P (péta) ≡ 10^{15}
E (exa) ≡ 10^{18}

énergie :

1 J ≡ 1 N m
1 kWh ≡ 3,6 MJ
1 TWh ≡ 3,6 PJ
1 TJ ≡ 0,278 GWh
1 PJ ≡ 0,278 TWh
1 tep ≡ 11625 kWh
1 TWh ≡ 0,0860 Mtep

pression:

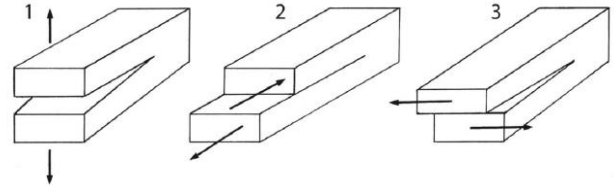
1 PSI ≡ 6894 Pa

- **nomenclature géologique et géothermique**

EGS : enhanced geothermal system ≡ système géothermique renforcé par stimulation des roches

fracture ≡ discontinuité structurale dans un volume rocheux, avec ou sans rejet et remplissage
→ fractures par ouverture (1), par glissement plan (2), par glissement anti-plan (3)

faille ≡ volume de discontinuité contraint et déformé entre deux compartiments rocheux avec déplacement relatif



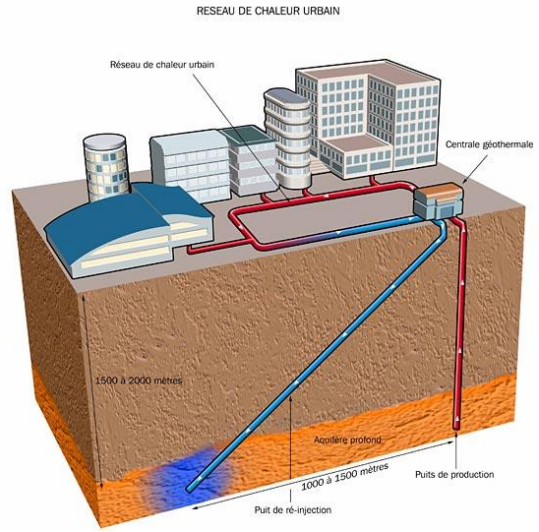
- **unités physiques en géologie et géothermie**

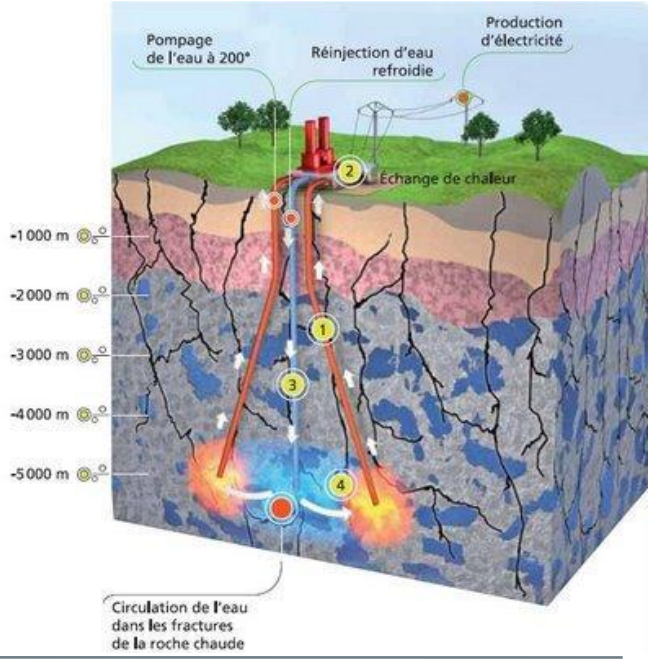
ϕ : porosité (%) ≡ (volume vide / volume roche)×100
μ : viscosité dynamique (Pa.s) ≡ contrainte visqueuse / taux de déformation
j : densité de courant de masse ($m^3.s^{-1}.m^{-2}$) ≡ débit volumique par unité de section
K : perméabilité (m^2) ≡ loi de Darcy $\boldsymbol{j} = -(K/\mu)\ \mathbf{grad}(P)$
darcy : unité CGS de perméabilité ≡ 1 D = 1 $cm^3\ s^{-1}\ cm^{-2}$ Po cm atm^{-1} = 9,87.10^{-11} m^2
λ : conductivité thermique (W m^{-1} K^{-1}) ≡ densité du flux thermique / gradient thermique
A : activité radioactive (Bq) ≡ nombre de désintégrations nucléaires par seconde
pH : potentiel hydrogène (acidité) ≡ $-\log_{10}(H_3O^+) \approx -\log_{10}[H_3O^+]$ avec $[H_3O^+]$ en mol/L

2.1. les filières géothermiques

- géothermie basse température
  - source froide des pompes à chaleur géothermales (réseau de tubes horizontaux, tubes verticaux dans des puits)
    - → nappes phréatiques, sols humides, réservoirs aqueux peu profond entre 10 et 200m (*rauracien, lusitanien*)
    - → températures 10 à 30°C, puissances thermiques (kW à 10^2 kW): chauffage, stokage thermique
    - → inconvénients possibles: terrain sec, végétation, fuites fréon, gypses (*à protéger de l'eau*)
- géothermie moyenne température
  - doublet (puits extraction, puits injection) avec pompe et échangeur en boucle fermée
    - → nappes aqueuses moyenne profondeur (500 à 2500 m), grande porosité: *grande oolithe* (*Dogger*), *Buntsandstein*, *Muschelkalk*
    - → températures moyennes (60 à 120°C): chauffage
    - → puissance thermique élevée (plusieurs MW), stockage solaire saisonnier possible.
- géothermie haute température (profonde)
  - doublets, multiplets (puits extraction, injection), pompes et échangeur en boucle fermée
    - → réservoirs faillés, porosité moyenne à grande profondeur (> 3000 m): *socles granitiques*
    - → puissance thermique et électrique élevée (plusieurs MW) en cogénération
    - → températures élevées (> 150°C)

unité de Soultz-Sous-Forêts





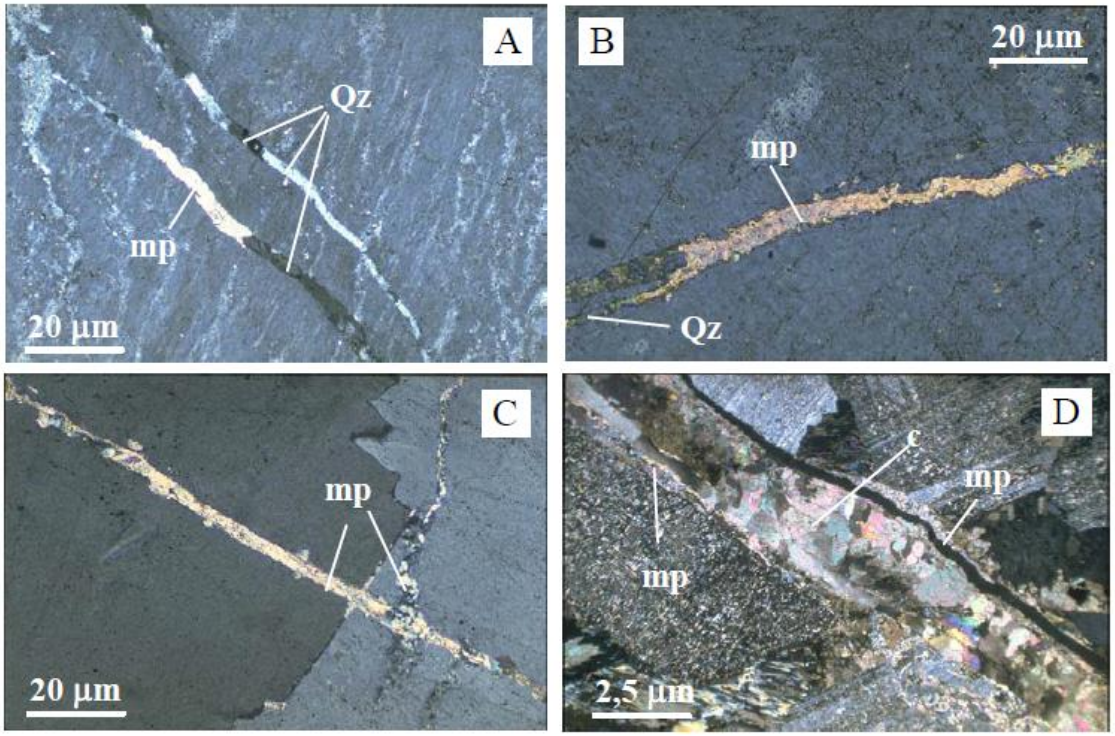
2.2. réservoirs-cibles en géothermie profonde (1)

2.2.1. géologie

- strates rocheuses cristallines plus profondes et faillées
- structures géologiques d'effondrement ou d'origine volcanique

2.2.2. caractéristiques physiques[(1)(2)(3)]

- porosité naturelle inter-cristalline à micro-fissures
- porosité moyenne (entre 10 et 20% selon la nature des réservoirs)
- perméabilité faible à moyenne de l'ordre de quelques centaines de µD (grès de Groß Schönebeck) à plusieurs D (Soultz sous-Forêts)
  - ► *micro-fracturation naturelle élevée des gisements*
- circulation naturelle de l'eau plus ou moins facile suivant le degré de concrétion obstruant la porosité



Microfissures naturelles dans le granite de Soultz-Sous-Forêts. Colmatage partiel par des quartz, micas, carbonates [Sausse, 1998]

(1) *Caractérisation et modélisation des écoulements fluides en milieu fissuré. Relation avec les altérations hydrothermales et quantification des paléocontraintes,* J. Sausse, thèse de l'Université Poincarré, Nancy, 20 octobre 1998

(2) *Influence of water-rock interactions on fracture permeability of the deep reservoir at Soultz-sous-Forêts, France,* L. André, V. Rabemanana, F.D. Vuataz, Geothermics 35 (2006) 507-531

(3) *Hydraulic stimulation of a deep sandstone reservoir to develop an Enhanced Geothermal System : Laboratory and field experiments, G*. Zimmermann, A. Reinicke, Geothermics 39 (2010) 70-77

2.2. réservoirs-cibles en géothermie profonde (2)

2.2.3. localisation géographique

- réservoirs gréseux ou granitiques faillés et micro-fissurés dans des fossés d'effondrement, coïncidant si possible avec une densité suffisante d'utilisateurs (villes, industries)

► site de Soultz-sous-Forêts (France) : deux cellules granitiques situés à 3,5 km et 5 km de profondeur, épaisses de 400 m à 1 km, 20 km² ; pieds du triple forage productif (GPK2, GPK3, GPK4) distants seulement de 600 et 650 m

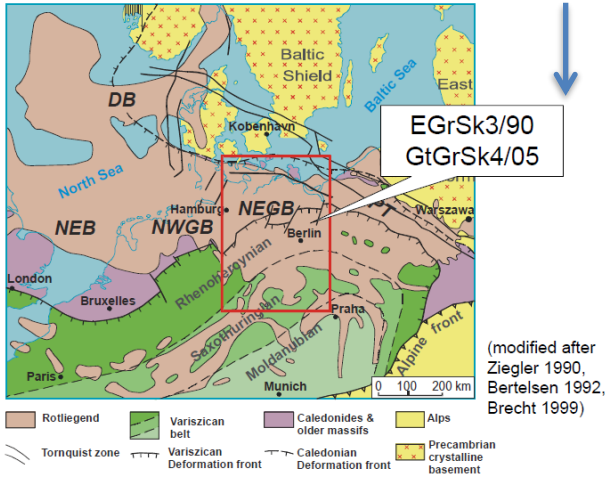
→ saumure à 180°C depuis 2008

→ centrale électrique de 1,5 MW_e

► site de Landau (Allemagne) : 25 km² à 3 km de profondeur

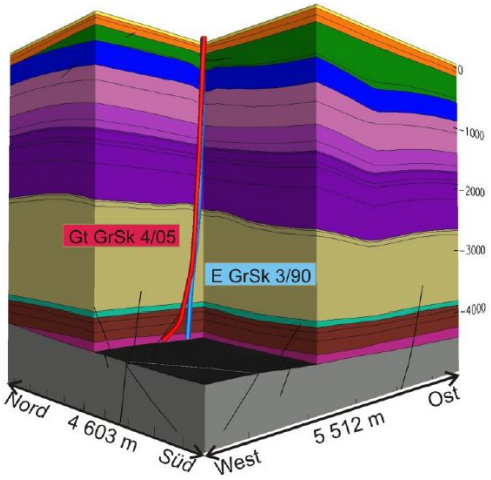
→ eau à 160°C depuis 2007

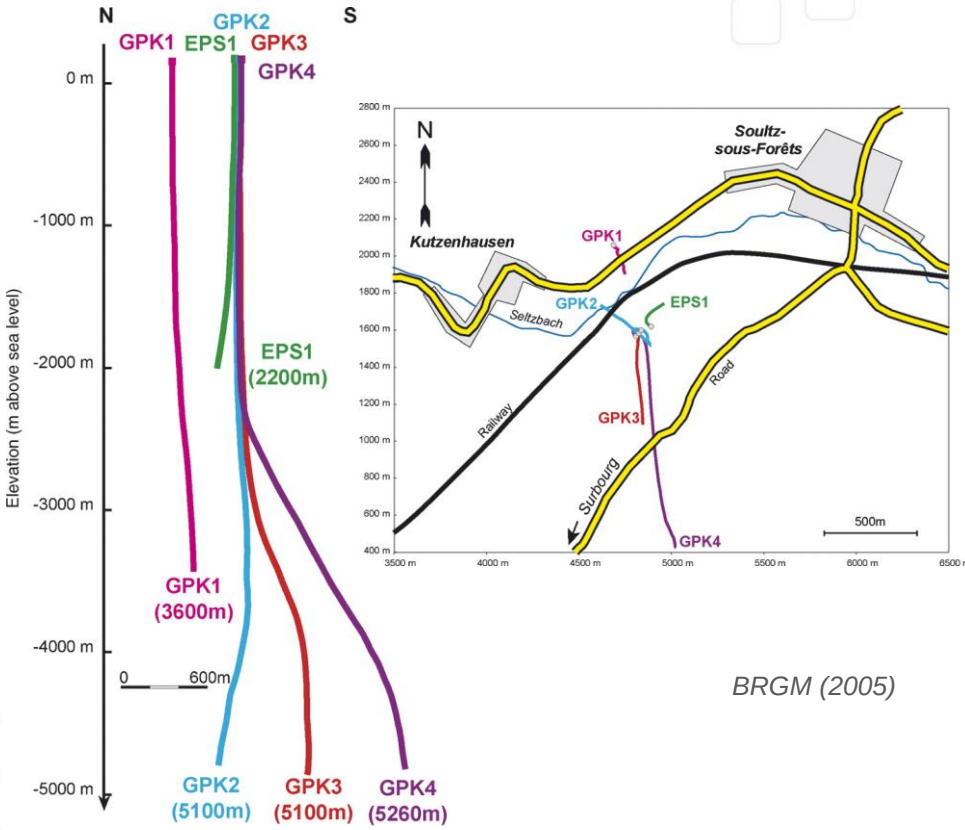
→ centrale de cogénération de 3 MW_e et 3 MW_{th}



EGrSk3/90
GtGrSk4/05

(modified after Ziegler 1990, Bertelsen 1992, Brecht 1999)



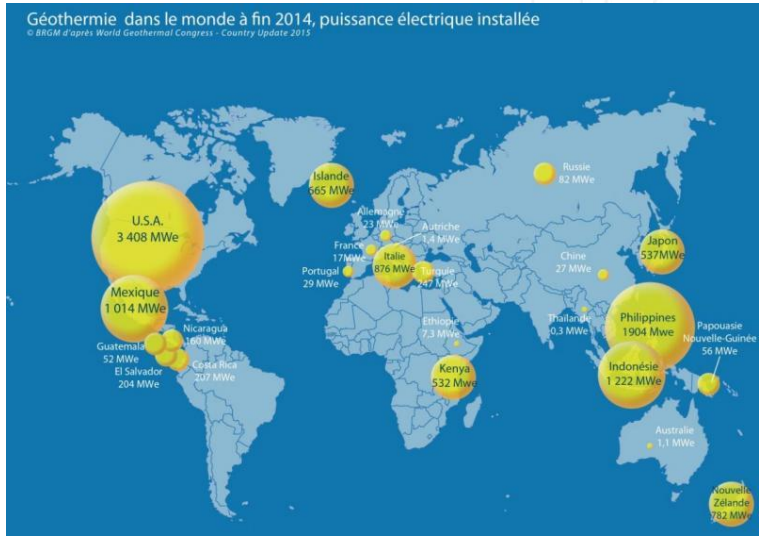


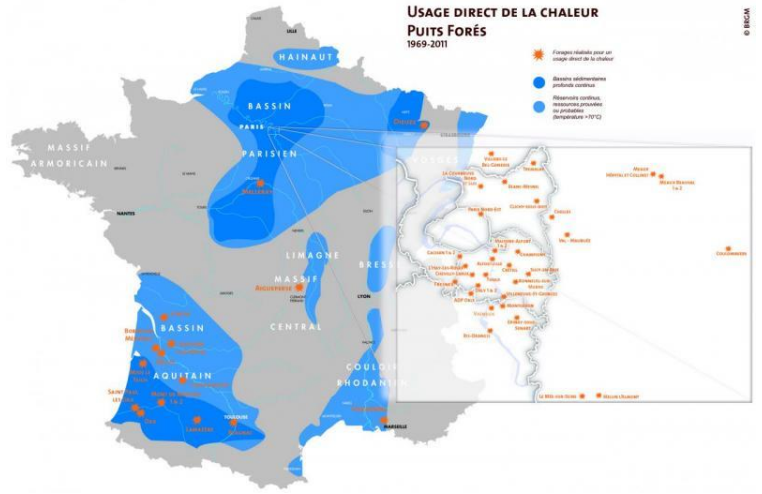
BRGM (2005)

2.2. réservoirs-cibles en géothermie profonde (3)

2.2.4. un potentiel énergétique immense[1]

- énergie stockée dans la croûte terrestre (0 à -5 km): E_G = 1,4.10^{26} J ≡ 39 milliards de TWh
  → environ 30% ≡ zones à haut gradient thermique
  → consommation d'énergie primaire totale mondiale: C_{EP} ≈ 13 Gtep/an ≡ 151.000 TWh/an
- flux géothermique naturel moyen de renouvellement: j_G = 65 mW/m²
  → potentiel géothermique mondial théorique exploitable durablement: P_G = 10 TW_e (≡10000 réacteurs nucléaires PWR)
  → puissance électrique récupérable: $P_{Gréc}$ = 200 GW_e (*techniques traditionnelles Larderello, Bouillante*) + 1000 GW_e (*techniques EGS*)
  → potentiel thermique basse température (chauffage, cogénération): P_{Gth} = 5000 GW_{th}.
  → puissance économiquement rentable (2050): P_{G2050} = 140 GW_e (1200 TWh/an) + 800 GW_{th}
- prospectives récentes[2] : utilisation soutenable de la géothermie
  ► *accroissement par étapes de la puissance produite jusqu'au régime permanent limite de renouvellement énergétique (équilibre entre soutirage d'eau et recharge naturelle en système ouvert ; gestion de la propagation du front froid de réinjection en boucle fermée)*
  ► *utilisation pérenne de stockage thermique solaire (héliogéothermie) ou de rejets thermiques industriels*.





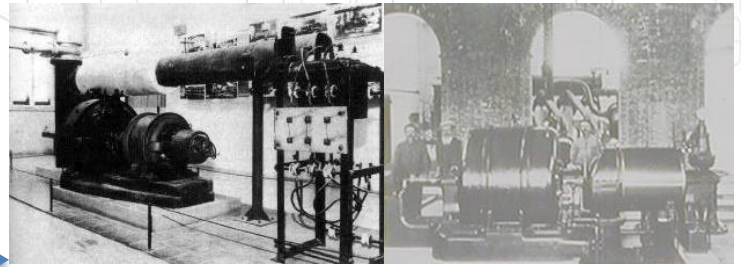
[1] *Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report,* R. Bertrani, Geothermics 41 (2012) 1-29
[2] *Sustainable geothermal utilisation – Case histories ; definitions ; research issues and modelling,* G. Axelsson, Geothermics 39 (2010) 283-291

2.3. les techniques d'exploration/exploitation (1)

2.3.1. historique

- **1913**: première usine géothermique de production électrique de 250 kWe utilisant l'eau à 250°C de deux puits géothermiques à Larderello en Toscane (Italie)[(1)]
- **2010**: géothermie haute énergie installée[(2)] 10,9 GW_e répartie sur 24 pays; 67,3 TWh_e/an
- **site de Larderello-Travale** (255 forages)[(3)] : vapeur d'eau (20 bar, 150 à 270°C) ; 28 centrales électriques géothermiques; puissance totale 810 MW_e ; 5,5 TWh_e/an

  → *exemple de production soutenable d'électricité géothermique*
- **Bouillante en Guadeloupe (France) depuis 1984 :** 2 centrales électriques; puissance totale 15 MW_e, eau à 250°C, réservoir -300 m à -1200 m ; 95 GWh_e/an (8% de la consommation de l'île) ; projet 3ème centrale 20 à 30 MW_e en cours
- **1987**: technologie **EGS** à Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin, France)
- **2006**: technologie **EGS** à Groß Schönebeck à 40 km au nord de Berlin (Allemagne)



(1) *100 years of geothermal power production,* J.W. Lund, GHC Bulletin (2004) 11-19
(2) *Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report*, R. Bertrani, Geothermics 41 (2012) 1-29
(3) *Geothermal power generation in Italy 2005-2009 update report,* Cappetti et al., Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010

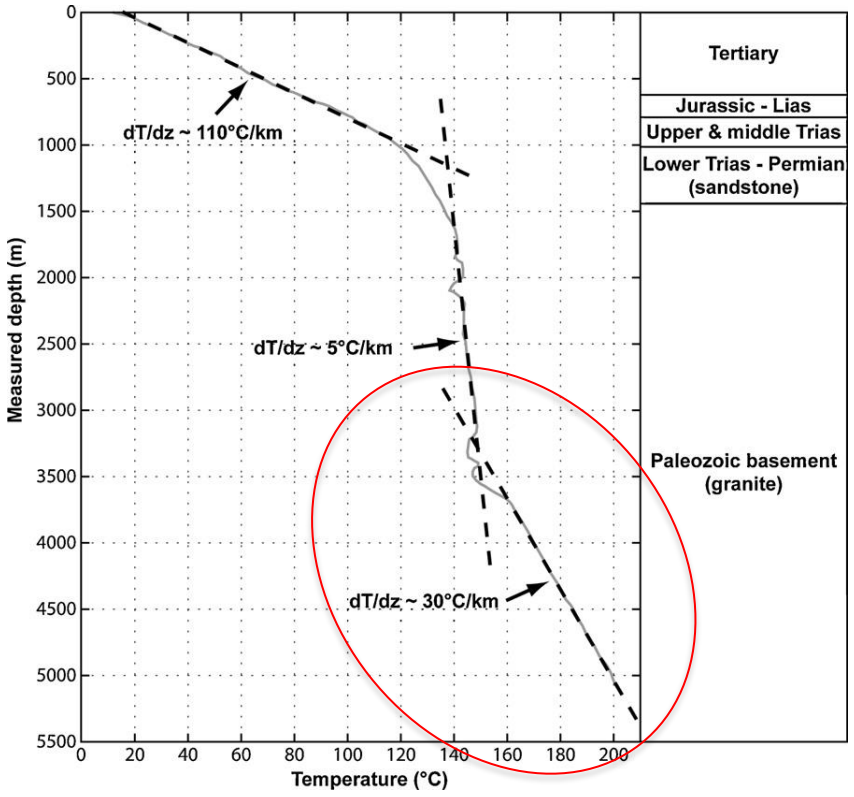
2.3. les techniques d'exploration/exploitation (1)

2.3.2. la stimulation hydraulique EGS

- réouverture des nombreuses fissures naturelles de la roche magasin plus ou moins occultées par les sécrétions sédimentaires
- roches elles-mêmes (granites, grès) généralement beaucoup plus perméables que les schistes à gaz → circulation naturelle permanente de saumures sous l'effet de gradients thermiques élevés (Soltz-sous-Forêts: 100°C/km)
  - ► pressions d'injection des liquides de stimulation 80 et 150 bars (près de 300 bar à Bâle, Groß Schönebeck)

2.3.3. caractéristiques techniques

- **projet de Soultz** : forages exploratoires GPK-1, EPS-1 à -2000 m (1987 et 1991)
- GPK-1 a été prolongé à -3600 m + forage GPK-2 à - 3880 m (1991 et 1998) ; distance 450 m entre les pieds GPK-1 et GPK-2
  - → tests positifs de circulation entre les deux puits pendant quatre mois dans le réservoir supérieur de granite fracturé
  - → présence de circulation naturelle de saumures acides (pH ~ 5) de haute salinité (100 g/L) dans une zone très étendue de fractures interconnectées de grande densité et de faible impédance hydraulique à comportement quasi-turbulent
- forages GPK-3 et GPK-4 jusqu'au granite inférieur à -5000 m (1999 à 2004)
  - → pieds GPK-2-3-4 alignés dans la direction de la contrainte maximale principale horizontale et du réseau de fractures, et distants de 600 et 650m pour favoriser la production géothermique
  - → gradient thermique : trois zones (zone de conduction thermique 0 à -1000 m (110°C/km) ; zone de circulation convective de 1000 à 3300 m (5°C/km) dans les grès et granites du Trias; *zone de conduction (30°C/km) dans le socle granitique du Paléozoïque, dont les failles et fissures sont peu connectées*



Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS), Genter et al. (2010) C. R. Geoscience 342 (2010) 502–516

2.3. les techniques d'exploration/exploitation (2)

2.3.4. contrôle de la sismicité induite par l'injection (IIS)

- **stimulation hydraulique à Soultz** :

  ►hausse de productivité : GPK-1 × **15** entre 2,8 et 3,6 km en élargissant les fissures existantes de quelques mm à quelques cm ; GPK-2 et GPK-4 entre 4,5 et 5 km : × **20** ; GPK-3, déjà élevée : × **1,5**

  ► bonne communication entre puits ; productivités-injectivités 0,2 et 0,4 L/(s.bar)

  ► microsismicité puits GPK-2 (2000): 627 événements M>1 (75 M>1,8 ; 26 M>2; M_{max} = 2,6)

  ► microsismicité puits GPK-3 : 250 événements M>1 (43 M>1,8, M_{max} = 2,9 2 jours après la fin de la stimulation

  ► microsismicité puits GPK-4 : 17 événements M>1, M_{max}= 2,6

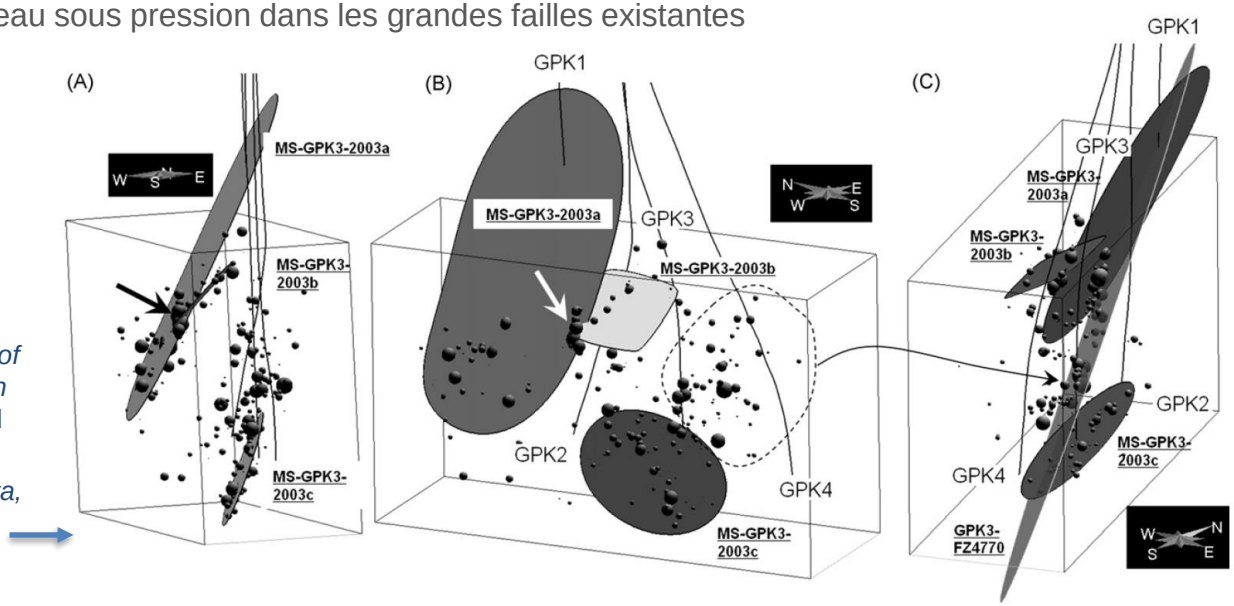
  ► microsismicité ressentie en surface, aucun dommage (*f* élevées 90 Hz)

  origine des micro-sismicités[1][2] : injection de volumes d'eau sous pression dans les grandes failles existantes

  ⇒ *élargissement des failles*

  ⇒ *diminution des contraintes préalables des failles*

  ⇒ *déclenchement de leur glissement plus ou moins long* à des vitesses limitées par leur rugosité, en lien avec l'hétérogénéité du rapport contraintes verticales/ contraintes principales horizontales qui contrôle le glissement global des plans de fractures.



[1] *Analysis of the microseismicity induced by fluid injections at the EGS site of Soultz-sous-Forets (Alsace, France) : implications for the characterization of the geothermal reservoir properties,* N. Cuenot et al., Pure and Applied Geophysics 165(5) (2008) 797-828.

[2] *3D model of fracture zones at Soultz-sous-Forêts based on geological data, image logs, induced microseismicity and vertical seismic profiles*, J. Sausse, C. Dezayes, L. Dorbath, A. Genter, J. Place, Comptes Rendus Geoscience 342 (2010) 531-545.

2.3. les techniques d'exploration/exploitation (2)

2.3.4. contrôle de la sismicité induite par l'injection (IIS)

- **stimulation hydraulique à Soultz (suite)** :

► causes principales de micro-séismes : trop grands volumes d'eau injectés [1][2] et trop grandes contraintes principales différentielles[3]

→ 1967: séisme de MI 5,3 sur le site de **Rocky Mountain Arsenal** (Colorado, USA) après injection de 30 ML/mois (11,4 L/s) pendant 4 ans !

→ 2003: séisme de MI 3,7 sur le site de **Cooper Basin** (Australie) après injection de 16,4 ML au total à 24 L/s maximum.

→ 2003: séisme de MI 2,9 sur le site de S**oultz-sous-Forêts** (France) après injection de 34 ML au total à 50 L/s maximum et 150 bar (avec impulsions à 90 L/s à 190 bar).

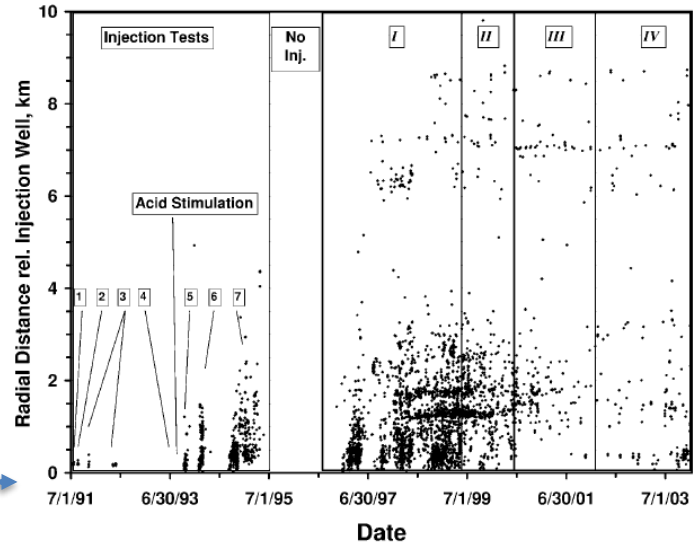
→ 2006: séisme de MI 3,4 sur le site de **Bâle** (Suisse) après injection de 11,6 ML au total à 55 L/s maximum.

2.3.5. sismicité induite à distance

- tests d'injections de 620000 m^3 saumures au puits de **Paradox Valley** (Colorado, USA)[4] entre 1991 et 1995 à -5000 m (27 L/s, 345 bar)

⇒ micro-séismes entre MI 3,5 et MI 4,3

⇒ micro-séismes induits ultérieurs à 8 km pendant les injections jusqu'en 2000



[1] *Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems,* E. L. Majer et al., Geothermics 36 (2007) 185-222.

[2] *Injection Induced Seismicity and Geothermal Energy*, T. Cladouhos et al., Transactions - Geothermal Resources Council, January 2010.

[3] *Observations of hydraulic stimulations in seven enhanced geothermal system projects,* L. Xie et al., Renewable Energy 79 (2015) 56-65.

[4] *Deep-Injection and Closely Monitored Induced Seismicity at Paradox Valley, Colorado,* J. Ake et al., Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No. 2 (2005) 664–683.

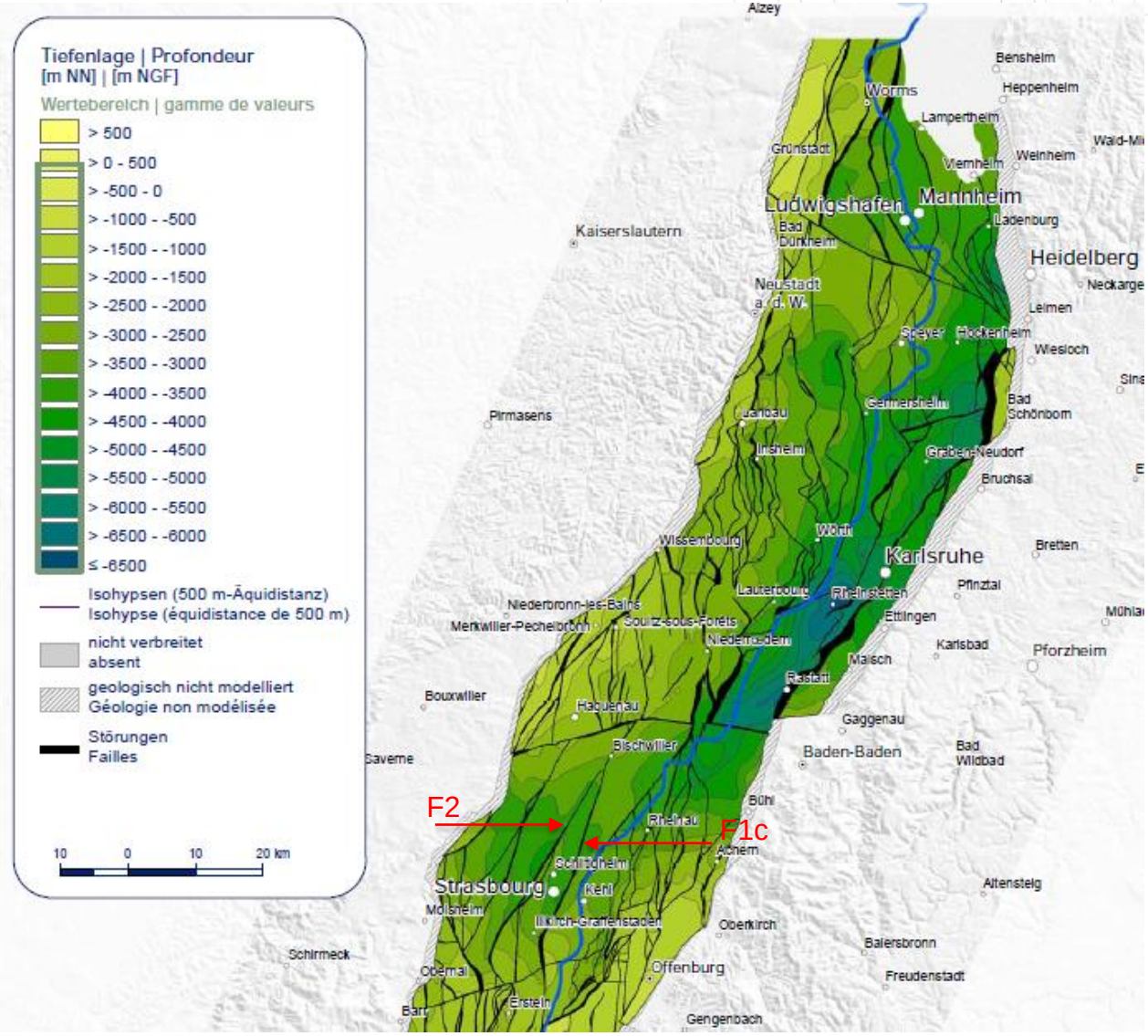
2.3. les techniques d'exploration/exploitation (3)

2.3.4. contrôle de la sismicité (suite)

- **stimulation chimique à Soultz**
  - ► 2003 à 2007: productivité puits GPK-2 × **1,25** ; productivité puits GPK-2 × **1,15**; productivité puits GPK-4 × **2,5**
  - ► **grès**: mélange HCl (dissolution des sécrétions calcaires, dolomites, calcites) et HF (dissolution des argiles et silices)
    → *prévention de la précipitation de* CaF_2 : prébalayage HCl seul, injection mélange RMA (regular mud acid à 12% HCl - 3% HF), rinçage à l'eau ou par un mélange HCl, KCl, NH_4Cl
    → *prévention précipitation de produits d'attaque* acide secondaires et tertiaires dans les grès alumino-silicatés par le RMA : production HF *in-situ* par composés ou addition d'agents chélatants des ions Fe, Ca, Mg, Al comme le NTA (acide nitrile triacétique)
  - ► 2007: puits GPK-3 et GPK-4 traités par injection à 50 L/s de quelques centaines de m^3 d'OCA-HT (mélanges acides chimiquement retardés pour hautes températures à base d'acides citrique, fluorhydrique, borofluorique et de chlorure d'ammonium) pour dissoudre les dépôts solides résiduels et augmenter l'inter-connectivité des trois puits, avec un succès très limité
- **résultats à Soultz**
  - ► vérification de la bonne communication entre puits
  - ► fonctionnement en boucle fermée du puits de soutirage GPK-2 (175 à 185°C) et de réinjection GPK-3 (70°C) avec un débit de 35 L/s
  - ► GPK-2 et GPK-3 reliés avec succès à une turbine à cycle de Rankine organique (isobutane) à 13000 tr/min
  - ► connexion depuis 2008 à une génératrice asynchrone de puissance de 1,5 MW_e tournant à 1500 tr/min
  - ► connexion des trois puits (voire des quatre) → 5 MW_e pour une puissance thermique de 50 MW_{th} (100 L/s à 185°C), le reliquat pouvant servir à un chauffage urbain en cogénération

3.1. connaissances géologiques

- système de failles
  - fossé d'effondrement du Rheingraben
    - → failles bordières et transfert N10-N20, contraintes principales horizontales NW-SE
    - → compartimentage probable :
      - prolongement de la faille de Baden-Baden au nord
      - prolongement de la faille de Lalaye-Lubine au sud
    - → incertitudes sur les failles transverses (N40? N90?)
- structure géologique locale
  - **modèle GeORG** (2013)
    - → failles majeures F1, F2, connectées au nord.
  - **modèle Fonroche**
    - → failles majeures F1b et F1c au sud de Vendenheim, coupées par des failles transverses N40/60 (barrière hydraulique)
  - **modèle EOST**
    - → failles majeures F1b et F1c au sud de Vendenheim, pas de faille transverse N60, mais des champs de fractures multiples à la jonction F1b et F1c, favorisant la perte d'eau d'injection



3.2. tests d'injection

- forage GT1
  - profondeur -4426 m
  - volume injecté 35959 m^3 = 35,0 ML , pression maximale 100 bar en pied de puits

    → *volume injecté très élevé, au regard des retours d'expérience connus*
- forage GT2
  - profondeur -4400 m, puis -5000 m (?)
  - volume injecté 61875 m^3 = 61,9 ML, pression maximale 150 bar en tête de puits

    → *volume injecté très élevé, au regard des retours d'expérience connus*

    → *vitesse d'injection 17 L/s élevée insuffisamment progressive, au regard des retours d'expérience connus*

    → *très grand différentiel GT2-GT1* ⇒ perte dans les failles ou accumulation d'eau piégée?
- sismicité induite
  - essaim de Strasbourg (distant de 4 km des puits GeoVen)

    → début 9 novembre 2019 (essais injectivité-productivité de 02—2018 à 11-2019)

    → 12 novembre 2019 (MI 3,1) et 13 novembre 2019 (MI 2,6)

    → 3-6 décembre 2020 (MI 3,59 et MI 2,6)

    → incertitude sur la profondeur (4 à 7 km?)
  - analyse de sismicité

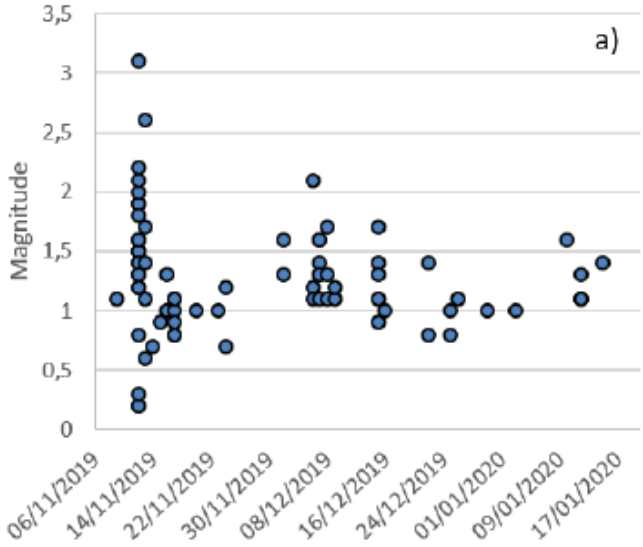
    → orientation des failles (EOST):

    N20 principale (décrochement sénestre) + N130-140 conjuguées

    → possibilité de saut de sismicité induite de Vendenheim à Strasbourg:

    événements sismiques 15-03-2018 et 29-08-2019?

    concomitance essais injection – essaim (corrélations possible à confirmer)



4. des questions en suspens

- lien possible entre essaims de Vendenheim et Strasbourg
- nécessité d'études de corrélation fine spatio-temporelles
- protocole d'injection probablement incorrect
  - volumes injectés trop élevés, pressions en tête de puits trop élevée, séquences d'injectivité trop intenses et rapprochées
  - pieds de puits trop distants?
- nécessité de plus de transparence (accès aux données)
- poursuite du projet ?
  - affiner le modèle structurel géologique
  - reprendre le puits GT2 en fonction des résultats de l'étude
  - respecter strictement le protocole de tests sans initiative privée non expertisée préalable
  - ***rétablir la confiance***