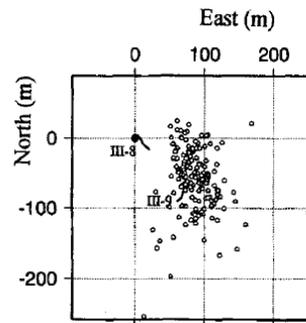
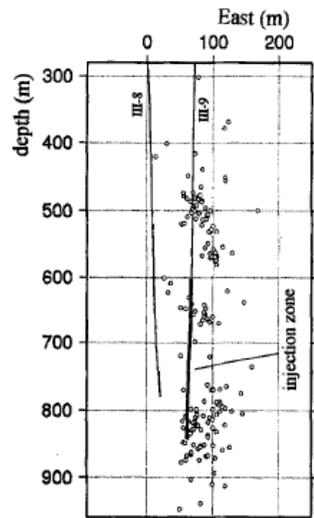


Stimulation hydraulique et sismicité induite

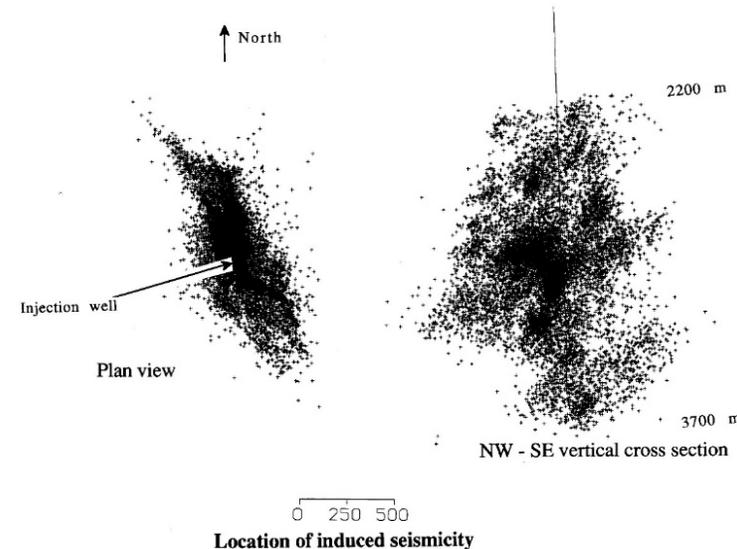
Application au développement de la géothermie EGS

F.H. Cornet, EOST, Strasbourg

1. Les deux techniques de stimulation hydraulique utilisées pour le développement des gisements “EGS”
2. Cartographie de la pression interstitielle associée aux écoulements en milieu fracturé
3. La notion de contrainte effective et de Volume Élémentaire Représentatif (VER) pour les massifs fracturés profonds
4. Application aux stimulations hydrauliques réalisées à Soultz
5. Vers un contrôle de la sismicité induite par des stimulations hydrauliques basées sur le principe de la dilatance



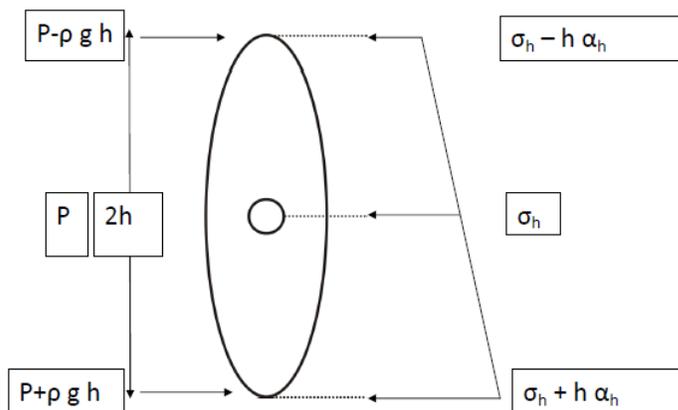
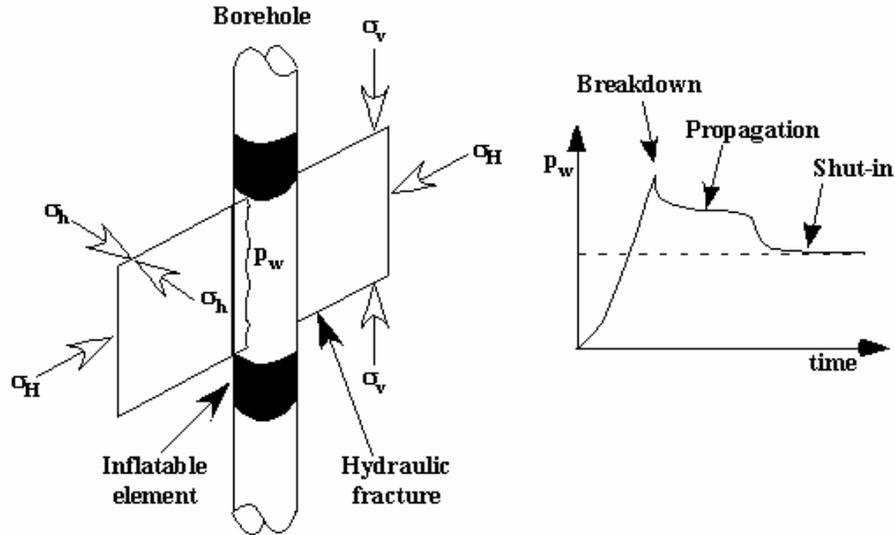
Sismicité induite par des stimulations hydrauliques dans le granite entre 600 m et 850 m de profondeur



Sismicité induite par des stimulations hydrauliques dans le granite entre 2800 m et 3500 m de profondeur

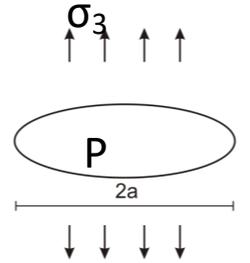
Stimulation par fracturation hydraulique

Initiation et propagation de la fracture

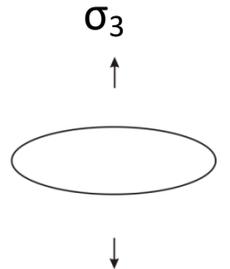


Stabilité du processus de rupture

1. **Pression uniforme jusqu'au fond de la fracture:**
 Le facteur d'intensité de contrainte K_I est proportionnel à $(\sigma_3 - P)(2\pi a)^{1/2}$,
 Il augmente avec la longueur de la fracture,
La fracture est instable si la pression reste constante (hydrofrac au gaz).



2. **Pas de pénétration de fluide:**
 La pression est appliquée uniquement à la paroi du forage, sans pénétration dans la fracture:
 Le facteur d'intensité de contrainte K_I est proportionnel à $(1/a)^{1/2}$; il diminue lorsque la fracture croit
la pression doit être augmentée pour propager la fracture

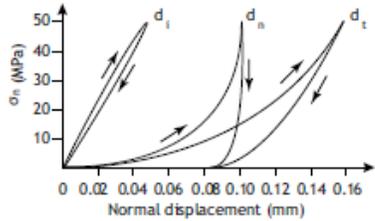


3. **Fracturation hydraulique avec un liquide incompressible**
 Il existe un gradient de pression dans la fracture et **la croissance est quasi-statique**

4. **Utilisation d'agents de soutènement pour maintenir la fracture perméable à la fin de l'injection**

Principes de la stimulation par dilatance

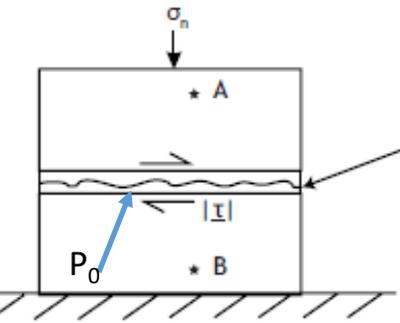
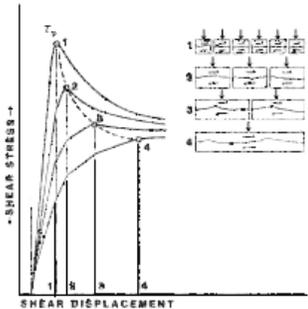
Dilatance de fracture



La raideur normale σ_n / u_n varie avec la **contrainte normale effective**

$$\sigma'_n = \sigma_n - P_0$$

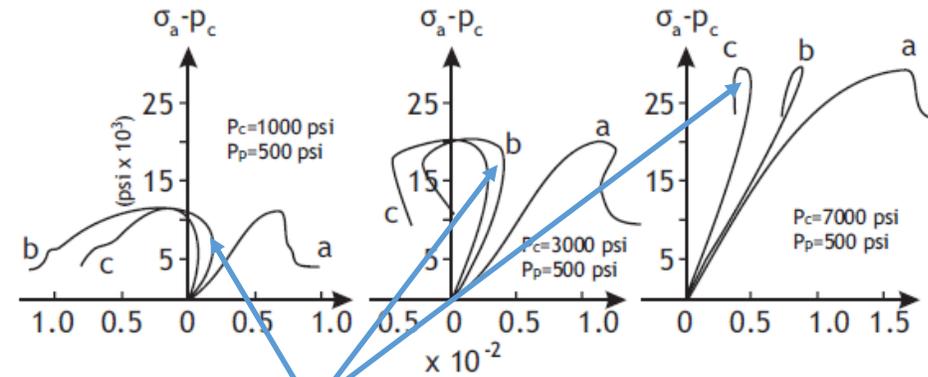
La raideur de cisaillement τ / u_t dépend des dimensions de la surface de fracture et de la **contrainte normale effective**



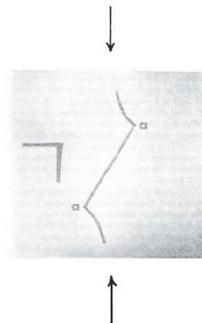
Fracture assimilated to a thin continuous soft material

La dilatance de fracture dépend de la rugosité de la fracture et de la **contrainte normale effective**

Dilatance de volume pour les roches cristallines



L'amorce de la dilatance dépend des **contraintes effectives** durant un essai triaxial sur un échantillon de roche cristalline

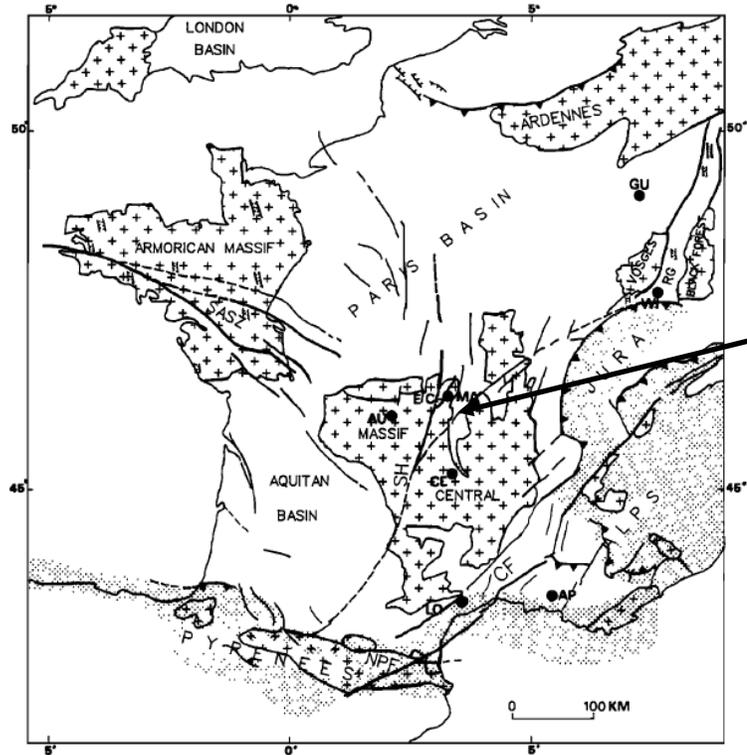


La dilatance de volume dépend de la croissance stable des micro-cracks et donc des **contraintes effectives**

Etude expérimentale à faible profondeur

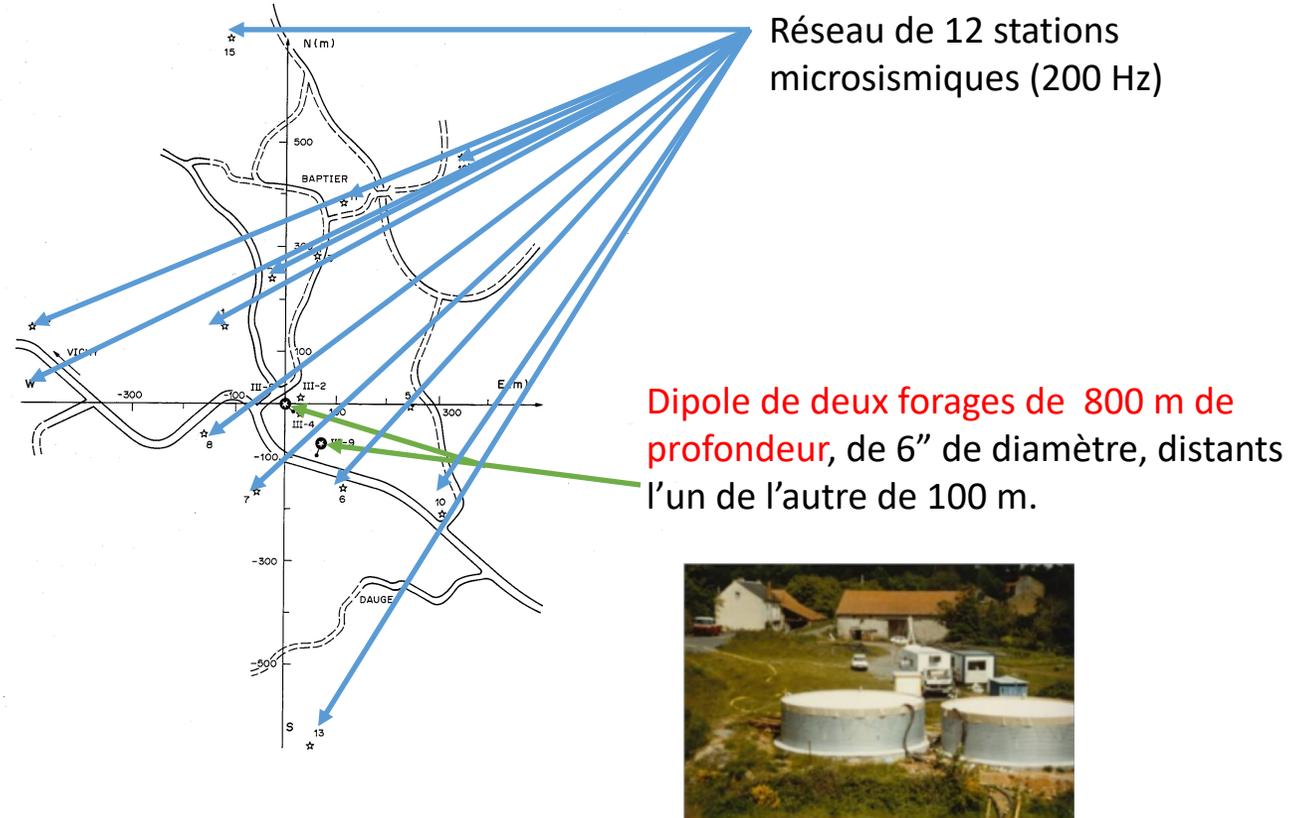
Résultats des essais du Mayet de Montagne (1978-1987)

- Caractéristiques géologiques du site



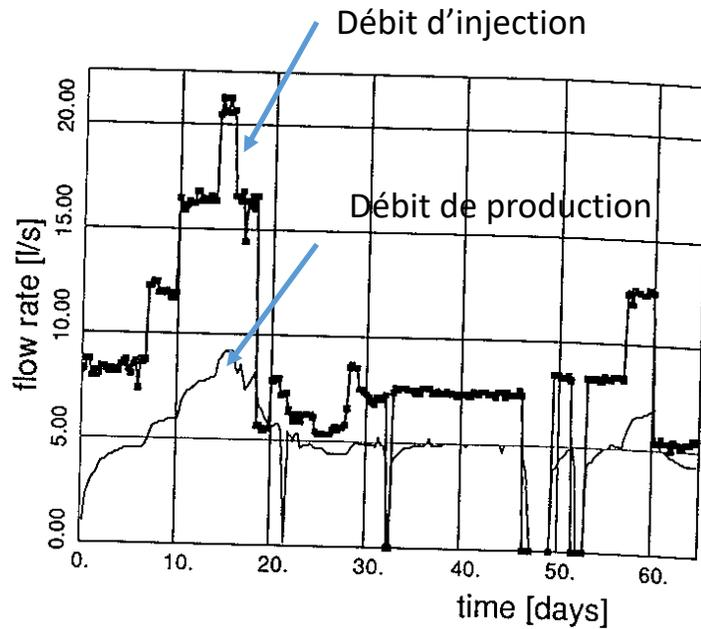
Le Mayet de Montagne

- Installations sur site (altitude: 540 m)

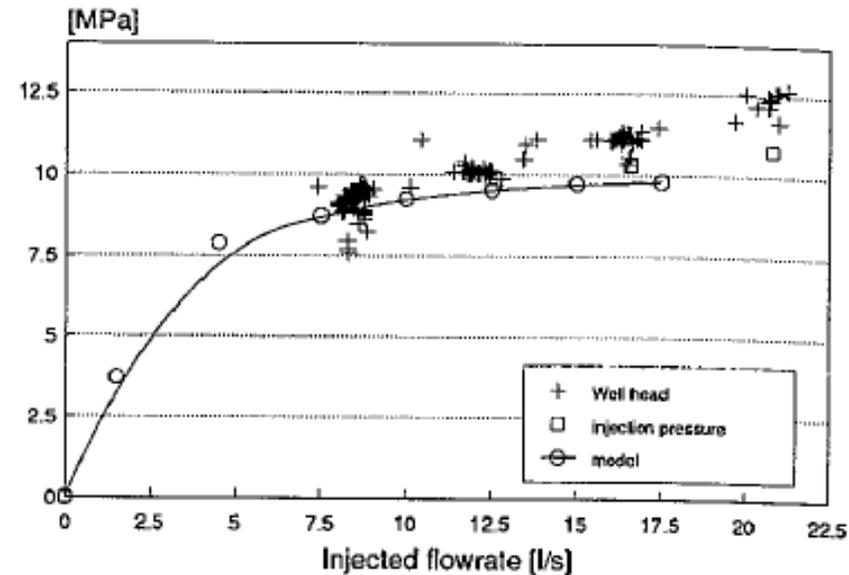


2 Bacs de stockage de 100 m³

Les essais de circulation à 750 m de profondeur



Débits d'injection et de production durant les essais de circulation (65 jours)



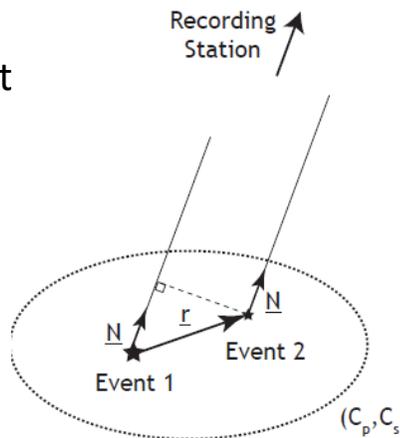
Variation de l'impédance hydraulique du forage en fonction de la pression d'injection

Ces essais ont démontré la nécessité d'une pompe dans le forage de production pour limiter les pertes

Ce que l'on apprend du signal microsismique

Les premières arrivées d'ondes P et S

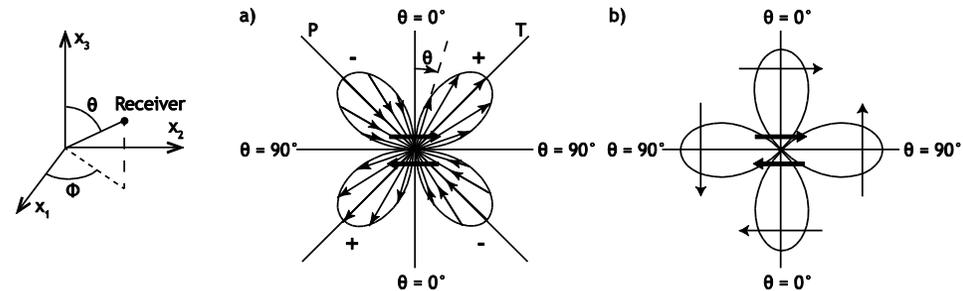
- Lorsque les vitesses des ondes P et S sont connues, les premières arrivées des ondes P et S sur au moins 4 stations donnent la localisation de la source.
- Lorsque de nombreuses stations 3 composantes sont disponibles, les premières arrivées permettent de réaliser une tomographie des vitesses.
- Lorsque de nombreuses observations sont disponibles au cours du temps, on peut réaliser des tomographies à intervalles réguliers qui renseignent sur l'évolution de la teneur en fluide.
- L'étude des sources répétitives appelées multiplets renseigne sur la présence d'aspérités qui permettent de préciser les mouvements asismiques



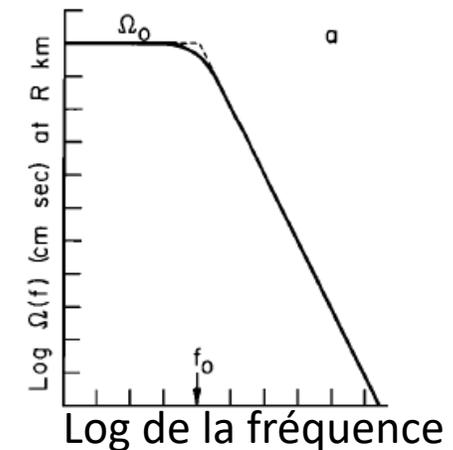
CFMR Paris 2019

Les diagrammes de polarité et le spectre en fréquences

- Le diagramme de polarité fournit le mécanisme au foyer



- Le diagramme log-log du spectre en fréquence du déplacement renseigne sur les dimensions de la source à partir de la fréquence coin, et sur le moment sismique, $M_0 = GDS$, à partir du plateau basses fréquences



Détermination du champs de contraintes regionales en integrant les résultats des essais hydrauliques et des mécanismes au foyer (Cornet and yin, 1995)

- Intégration des résultats d'essais hydrauliques entre obturateurs (essais HTPF) avec les mécanismes au foyer de la sismicité induite

$$\sigma_n = \tilde{\sigma} \underline{n}^k \cdot \underline{n}^k = \sigma_{ij} n_j^k n_i^k \quad \underline{s} \cdot (\underline{\tau}/|\underline{\tau}|) = 1$$

- Model à 6 paramètres

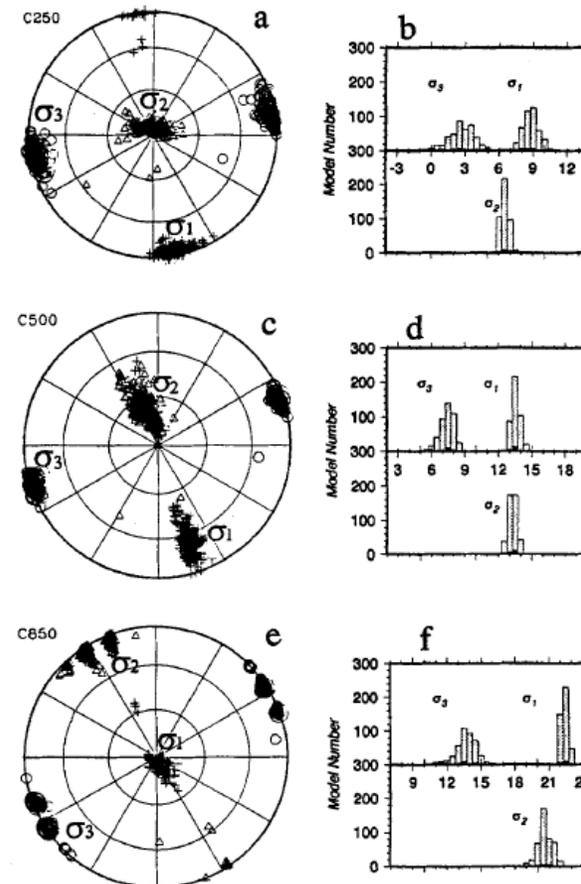
$$\tilde{\sigma}(\underline{x}) = \tilde{\sigma}(\underline{x}^0) + (x_z - x_z^0) \tilde{\alpha}^z$$

- Pour le Mayet de Montagne : 22 essais HTPF et 87 mécanismes au foyer:

a), c) et e) indiquent les directions principales à 250 m , 500m, 750 m.

b), d), and f) indiquent les amplitudes des contraintes principales aux mêmes profondeurs

- Cette solution est compatible avec 95 % des données HTPF et 70 % des mécanismes au foyer: 30% des mécanismes au foyer NE sont PAS compatibles avec l'hypothèse d'un champ de contrainte homogène



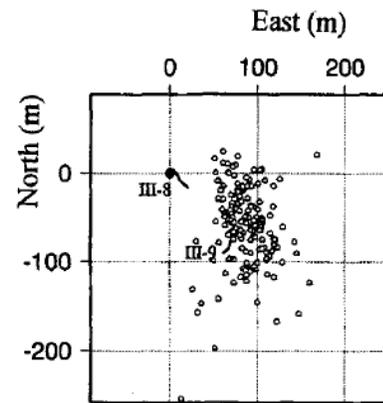
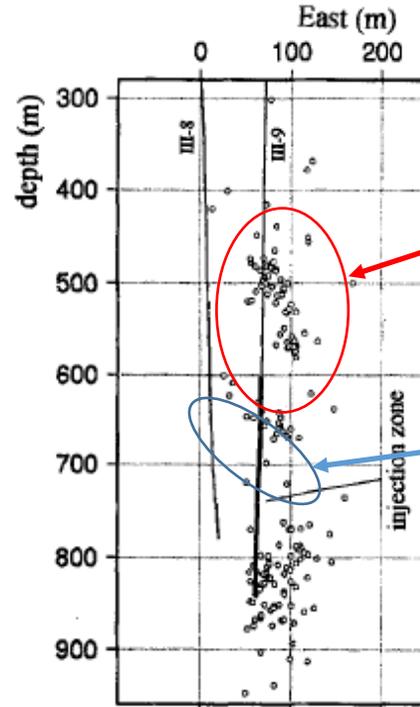
Cartographie de la pression dans le massif, Cornet and Yin, 1995

- A partir de la connaissance du champ de contrainte il est possible de calculer la pression requise pour induire les glissements observés sur les plans de fractures des mécanismes au foyer compatibles
- En supposant un critère de Coulomb et en ne considérant que la variation de pression dP par rapport à la pression hydrostatique P_0 , on obtient :

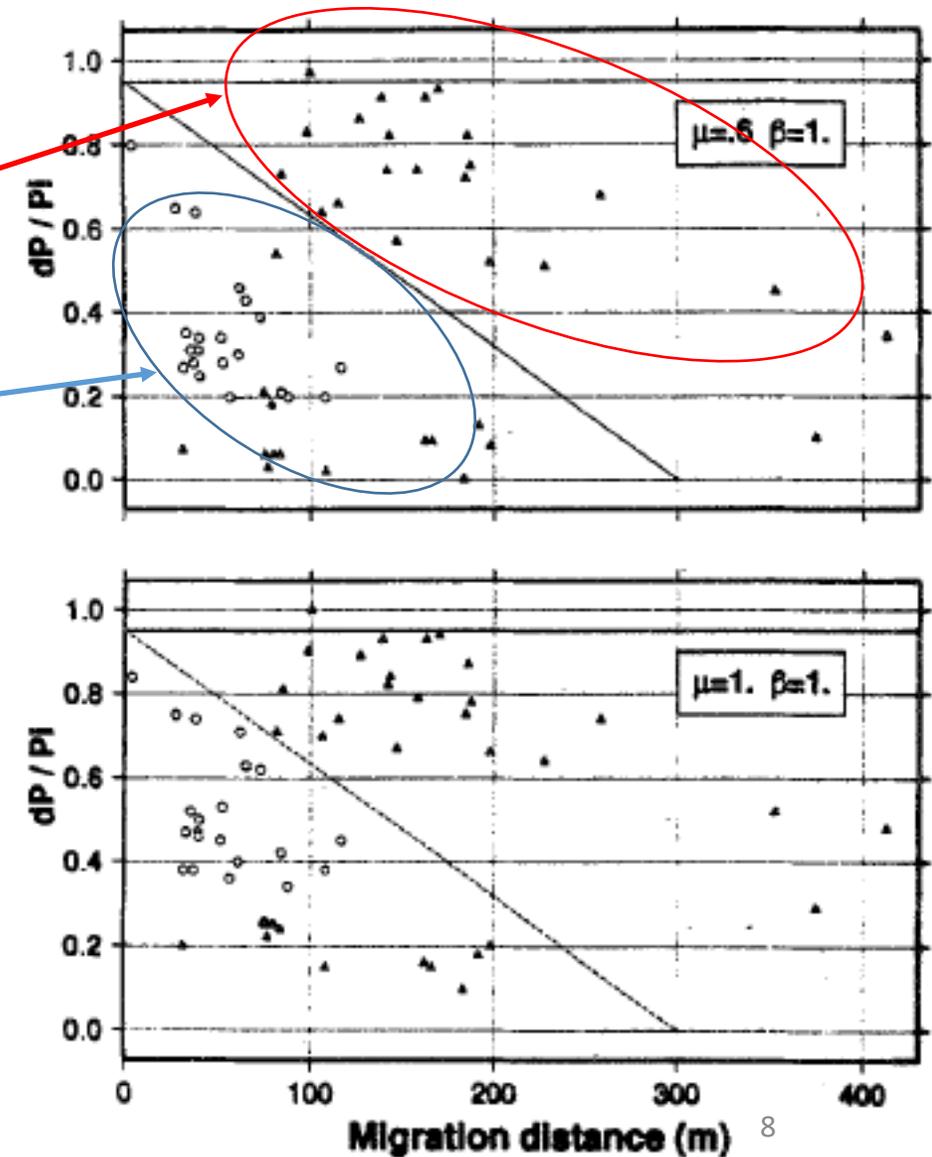
$$dP = [\mu (\sigma_n - \beta P_0) - |\tau|] / \mu \beta$$

où, τ est la contrainte de cisaillement dans le plan de glissement, σ_n est la contrainte normale supportée par le plan, μ est le coefficient de frottement et β un paramètre compris entre 0.5 et 1.

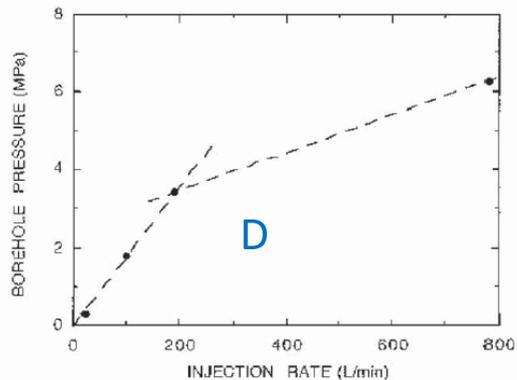
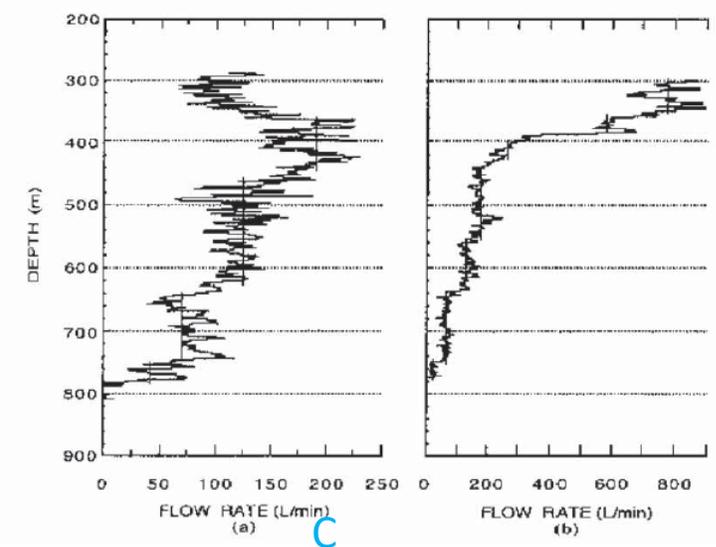
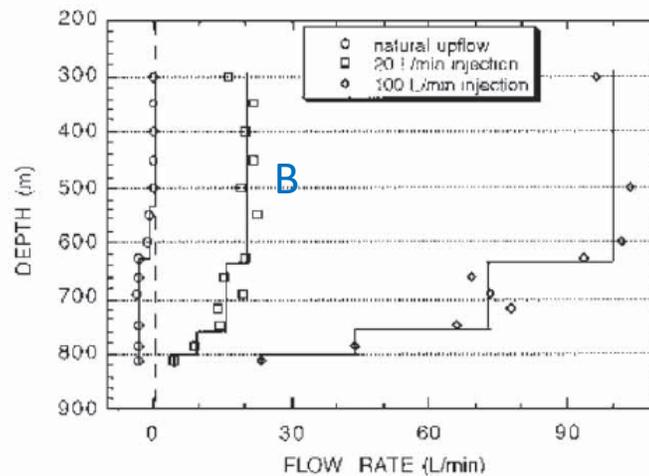
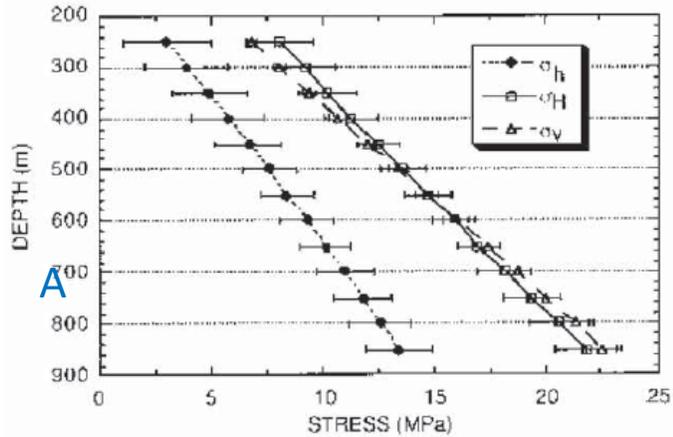
Les résultats sont indiqués pour deux valeurs du coefficient de frottement, en supposant $\beta = 1$



CFMR Paris 2019



Couplages hydro-mécaniques non linéaires au Mayet de Montagne (Cornet and Morin, 1997)



A: Résultats de la détermination du champ de contrainte

B: Mesures de débit par “pulses” thermiques

C: Mesures de débit par micromoulinet

D: impédance hydraulique du forage

La pression d'eau à 380 m est égale à 6.5

MPa quand le débit d'injection est de

750 l/sec: $\sigma_h < P_w \leq \sigma_v < \sigma_H$

Les écoulements sont
entièrement contrôlés par
deux ou trois zones
fracturées.

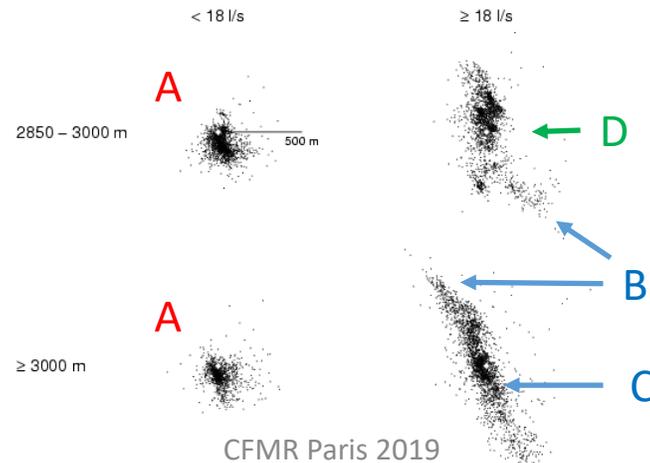
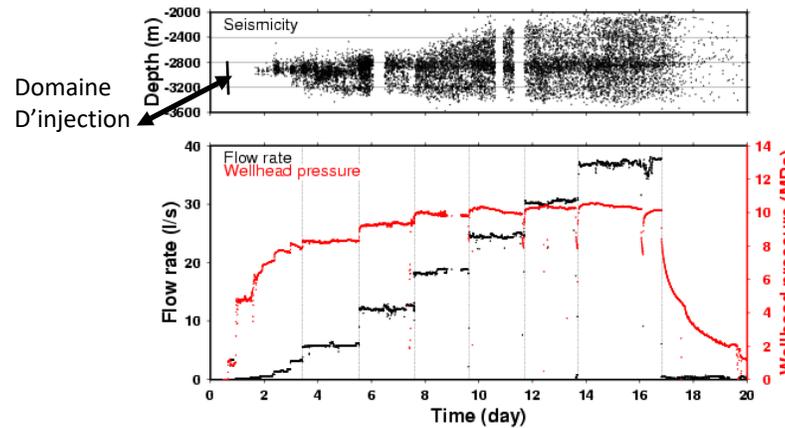
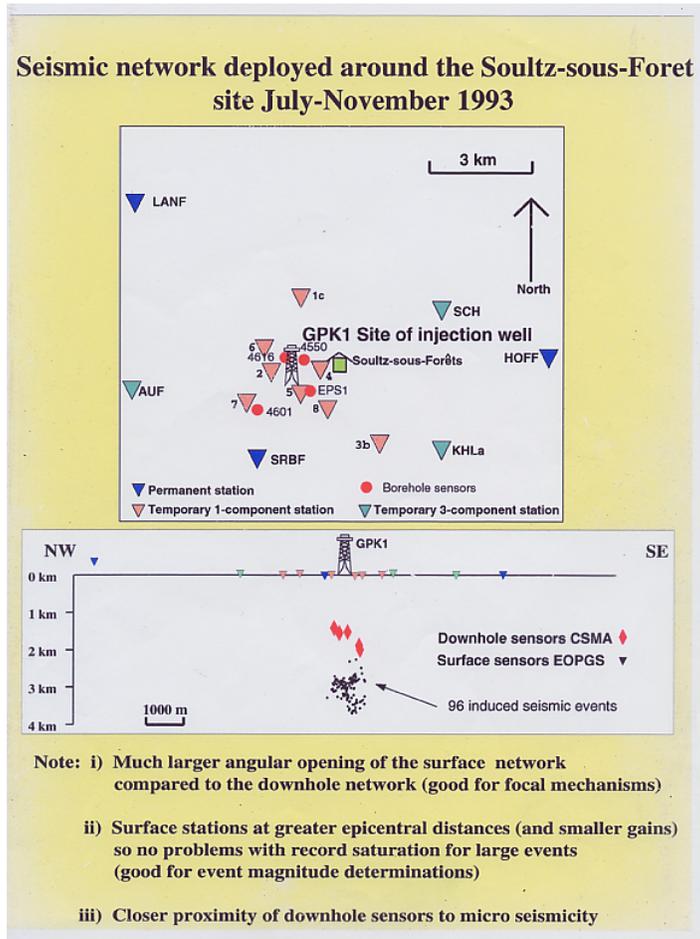
La notion de volume élémentaire représentatif (VER) et de contrainte effective pour le site du Mayet de Montagne

- Le VER pour les essais hydrauliques est de 1 m^3 ;
- L'incertitude sur les mesures de contrainte normales est d'environ 0.5 Mpa ;
- L'incertitude sur les directions: $5 \text{ à } 10^\circ$;
- La magnitude des événements microsismiques est comprise entre -2 et 0 , ce qui implique que l'aire des zones de glissement varie entre 1 et $10 \times 10 \text{ m}^2$;
- Le VER pour la caractérisation du champ de contrainte moyen est donc de l'ordre de $50 \times 50 \times 50 \text{ m}^3$;
- Mais la pression n'est pas homogène à l'échelle de $50 \times 50 \times 50 \text{ m}^3$;
- Conclusion : la distribution des pressions d'eau est contrôlée par les écoulements à l'intérieur du réseau de fractures à l'échelle du VER utilisé pour le modèle de contrainte.
- Le concept de contrainte effective ne peut pas être appliqué à l'échelle du REV utilisé pour définir les contraintes moyennes dans le massif.

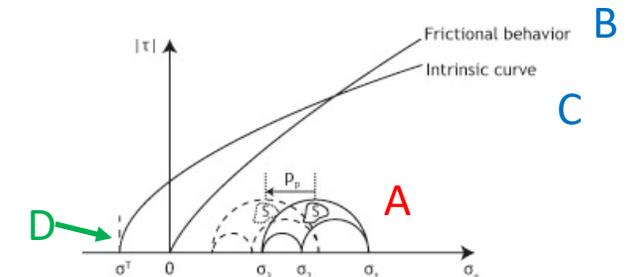
Les quatre niveaux de couplage hydromécanique observés durant les stimulations pour des profondeurs supérieures à 2.5 km (Soultz; Cornet, 2016)

La stimulation hydraulique du réservoir supérieur (2800m – 3500 m)

Modeling

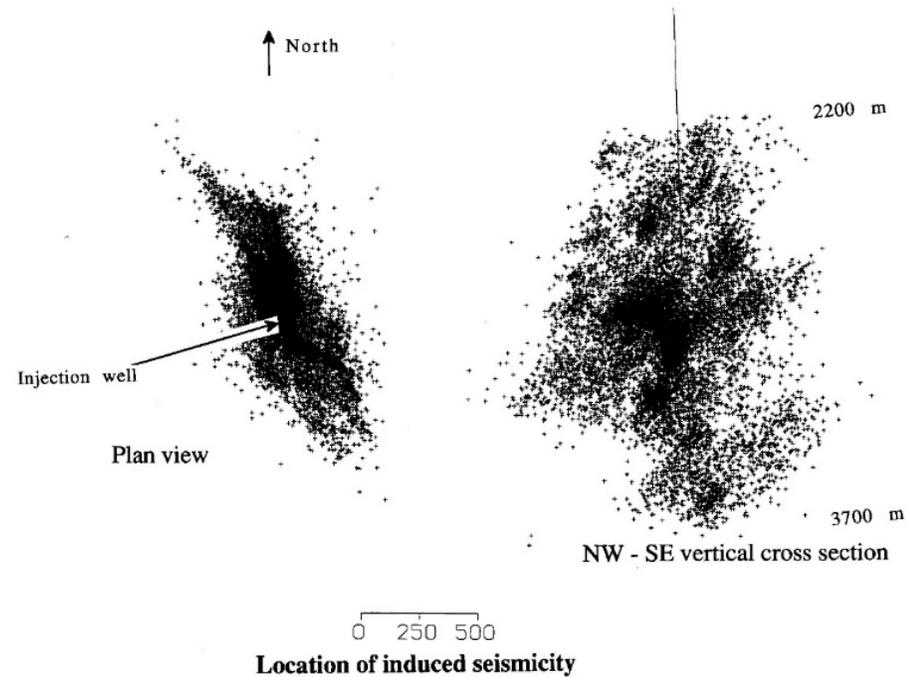


- **A** : Poroélasticité + effet Kaiser
- **B** : Glissement le long de fractures préexistantes
- **C** : Formation d'une zone de rupture en cisaillement
- **D** : Fracturation hydraulique

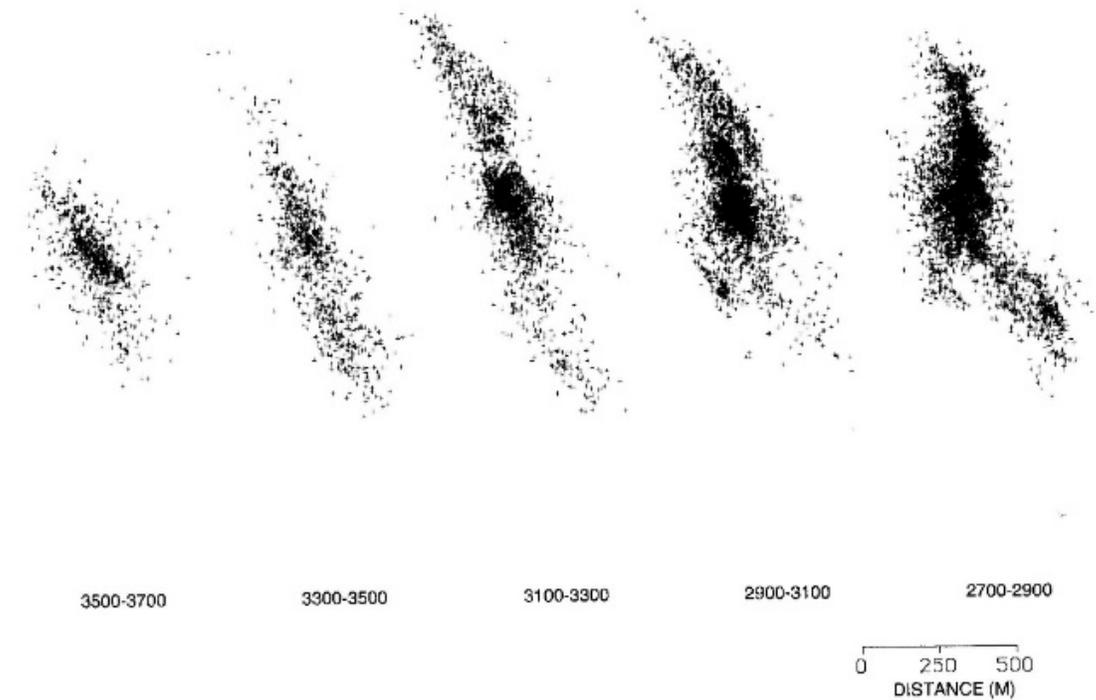


Le nuage de microsismicité induite durant la stimulation de GPK1 (Cornet and Jones, 1994)

Projection horizontale (gauche)
et projection dans un plan vertical orienté N150°E (droite)

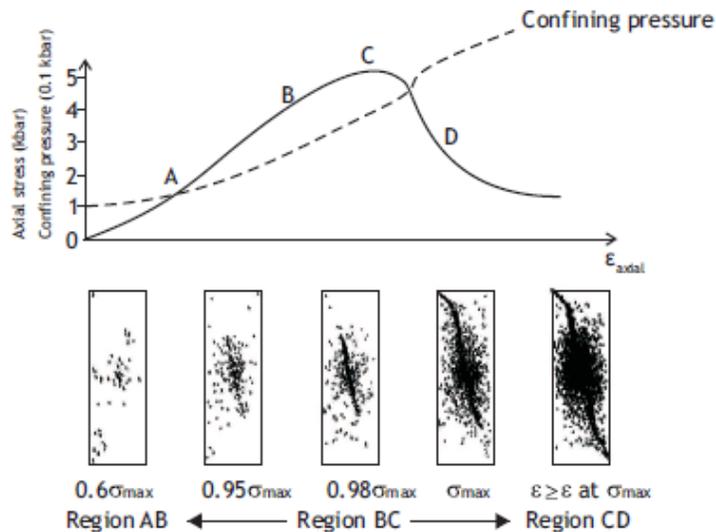


Coupes horizontales à travers le nuage à
différentes profondeurs



La notion de contrainte effective et la formulation d'un critère de rupture en compression à l'échelle du réservoir

Résultats d'essais au laboratoire



Generation of acoustic emission during triaxial testing (reproduced from Jaeger and Cook, 1979, with permission from Willey).

Critère de rupture de Hoek et Brown :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma^c \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma^c} + 1 \right)^{1/2}$$

D'après les mesures de contrainte dans GPK1

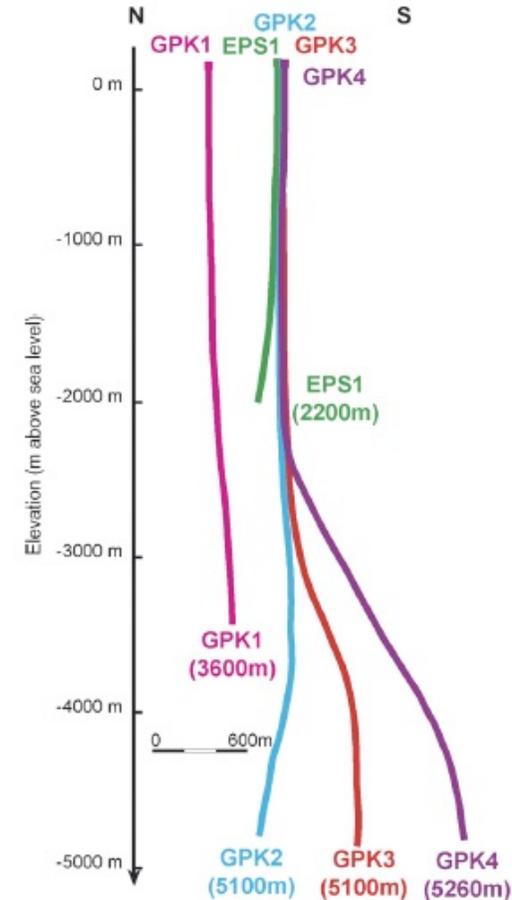
- L'exploitation des observations faites dans le forage GPK1 permet de préciser l'état de contrainte en profondeur (Cornet et al., 2007) :
 - Orientation de σ_H : $N170^\circ E \pm 15^\circ$,
 - $0.53 \sigma_v < \sigma_h \leq 0.54 \sigma_v$; $0.95 \sigma_v \leq \sigma_H \leq 1.1 \sigma_v$
- Quand la pression d'injection se stabilise, la variation de pression de pore au voisinage du forage à 2900 m est égale à la surpression dans le forage (conductivité hydraulique loin du forage de 10^{-17} m^2) : 9.1 MPa
- La contrainte principale minimum effective à 2800 m : $\sigma'_h = 0$
- Proposition : $\sigma^c = \sigma'_H$, pour $P_0 = 9.1 \text{ MPa}$,
 $36 \text{ MPa} < \sigma^c < 41 \text{ MPa}$
- Evaluation de m à partir de la contrainte maximum effective à 3400 m :
 $5 < m < 10$, domaine de valeurs pour les carbonates et les matériaux riches en argile.
- La surface de rupture est proche de la direction de σ_H à 2800 m pour des conditions de compression uniaxiale. Elle tourne avec la profondeur du fait de l'augmentation de contrainte principale effective minimum.

Developpement du réservoir profond (4500m 5000m) à Soultz

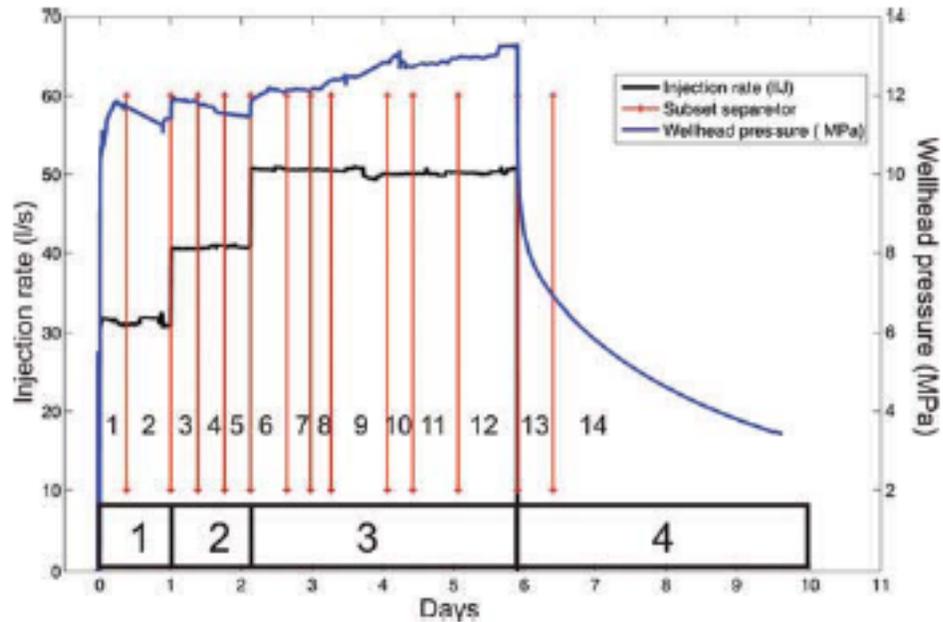
(Gérard et al., Geothermics, 2006)

- Les différentes phases du développement

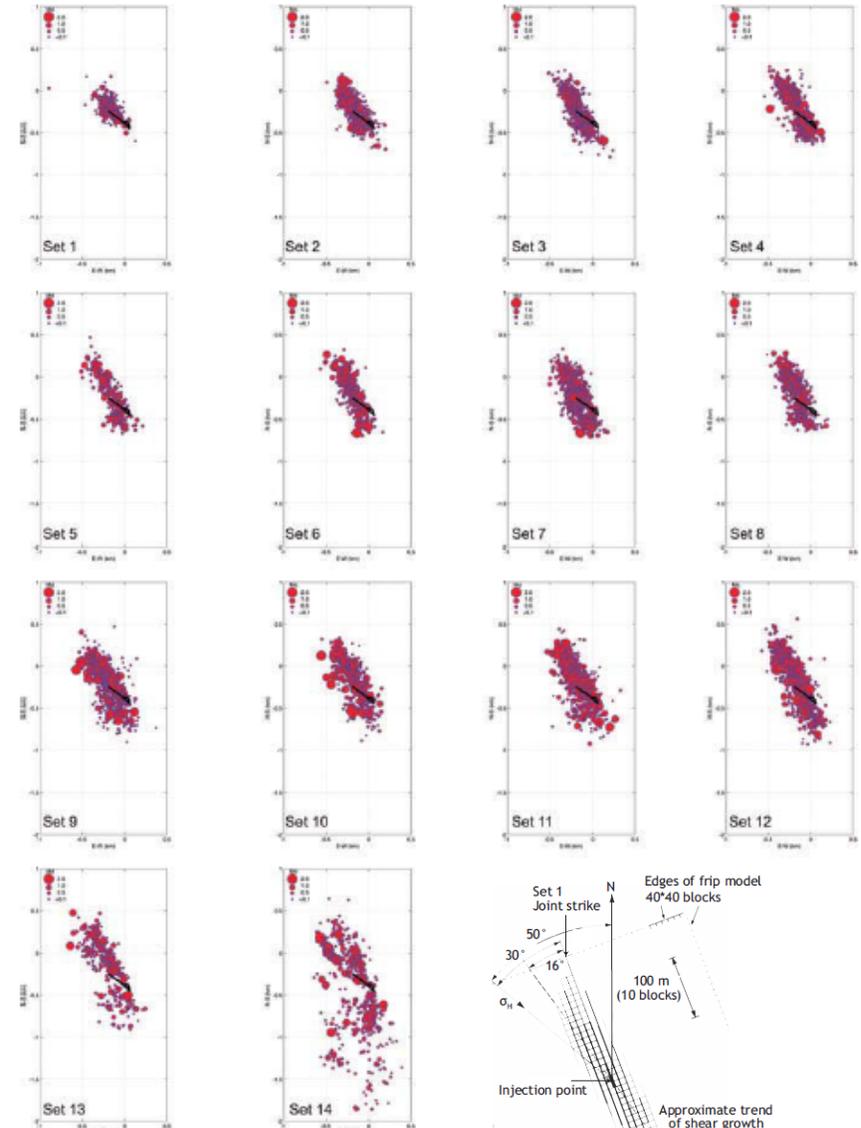
- 2000 : approfondissement de GPK2 à 5060 m et stimulation par increments de débits;
- 2002 : forage du puits dévié GPK3 jusqu'à 5000 m, profondeur à laquelle il est à 650 m de GPK2;
- 2003-2004: stimulation de GPK3 et essai de circulation entre GPK2-GPK3; forage du puits dévié GPK4 jusqu'à 4985 m, profondeur à laquelle il se trouve à 700 m de GPK3;
- 2004-2005: stimulation de GPK4; essais de circulation entre GPK3 (puits d'injection), GPK2 et GPK4 (puits de production)



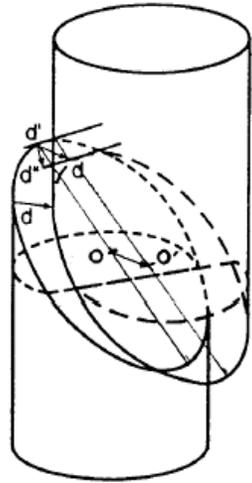
La stimulation hydraulique de GPK2, en dessous de 4500 m (Calo et al., 2011)



La courbe bleue est la pression en tête de puits, la courbe noire est le débit d'injection. **Tant que l'injection a lieu**, le nuage microsismique reste contenu à l'intérieur de la zone de cisaillement, qui devient de plus en plus épaisse au fur et à mesure que l'injection se poursuit et pourrait être modélisée comme une inclusion d'Eschelby ; **Quand l'injection s'arrête**, la sismicité induite souligne la percolation du fluide le long des structures préexistantes; elle pourrait s'expliquer par une chute de la contrainte tangentielle effective à la paroi de l'inclusion d'Eshelby. **Si l'on suppose que la rupture est caractérisée par le critère de Hoek et Brown défini à 3500 m**, on remarque que la surpression $P_w = 11.5 \text{ Mpa}$, suppose que la contrainte maximale est comprise entre 114 Mpa et 132 Mpa , alors que les valeurs extrêmes déduites des observations in situ sont 115 MPa - 133 Mpa , pour 4800 m.



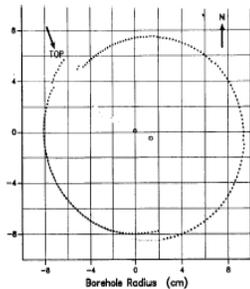
Mise en evidence de mouvements asismiques lors des stimulations hydrauliques de 1993 (Cornet et al., Pageoph, 1997)



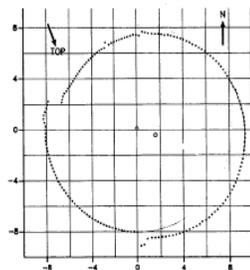
Existing fracture

Borehole geometry result from shear displacement along existing fracture (general case):

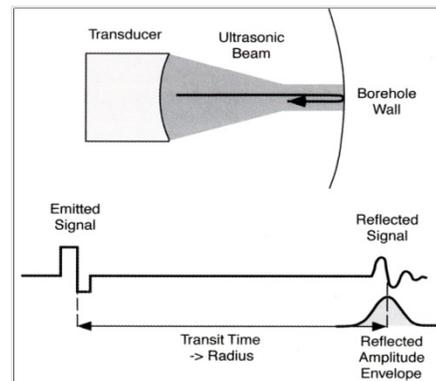
d = Displacement
 d'' = Strike component
 d^* = Dip component



A) P= 25



B) P= 15



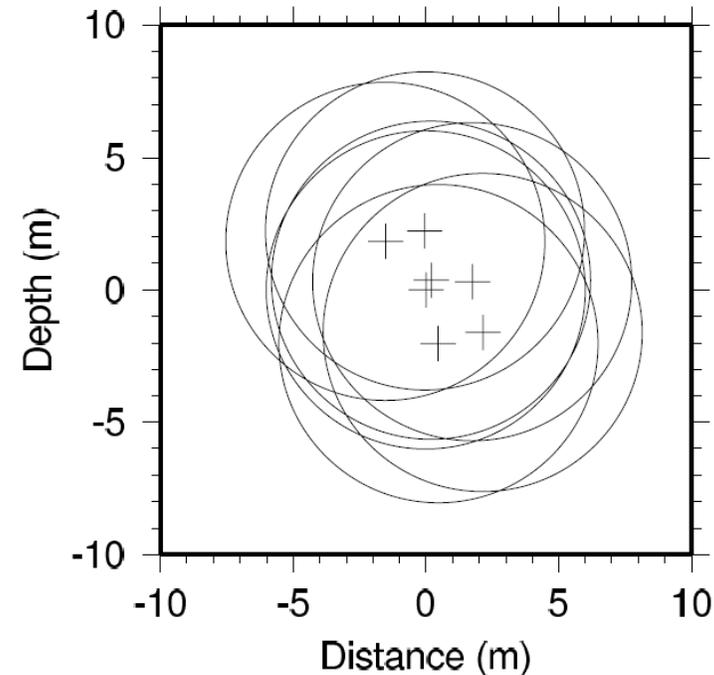
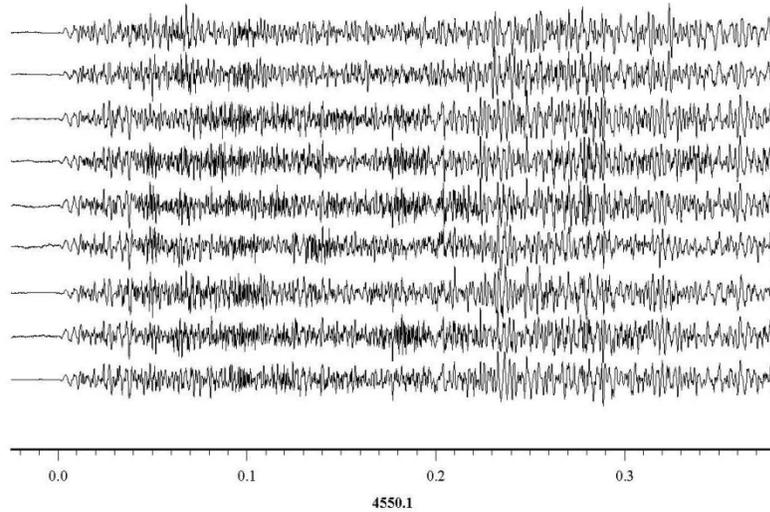
Amplitude des mouvements de cisaillement:
 Z est la profondeur et A est l'amplitude du déplacement

Z (m)	β	α	λ	A (cm)	ε_λ	ε_A (cm)	SX (cm)	ε_{SX} (cm)
2966	105	84	110	4.7	5	0.7	0.5	0.1
2867	259	62	304	2.2	3	0.1	1.45	0.07
2976	269	61	218	0.8	15	0.2	0.5	0.05
2887	298	75	271	0.85	8	0.3	0.28	0.1
2973	273	78	198	0.4	10	0.06	0.22	0.04
2925	48	86	99	4.3	13	1.3	0.5	0.14

Aucune magnitude égale ou supérieure à 3;
 Les magnitudes maximums observées sont restées inférieures à 2. Ceci implique que les sources les plus grandes avaient des rayons de l'ordre de 100 m, avec des déplacements relatifs de l'ordre du 1 mm.

Analyse des “multiplets” observés durant la stimulation hydraulique de GPK1 (Bourouis & Bernard, GJI, 2006)

Le concept de source répétitive = Multiplet



Le **model de Brune** (Brune, JGR,1970) est utilisé pour évaluer la chute de contrainte et l’amplitude du déplacement. Pour des dimensions de source de l’ordre de 5 m , les mouvements relatifs sont de l’ordre de quelques dixièmes de millimètres.

Comparaison entre les mouvements sismiques et asismiques grâce à l'analyse des multiplets

Bourouis and Bernard, GJI, 2006

Le déplacement mesuré en A à la fin de l'injection atteint 4.3 cm.

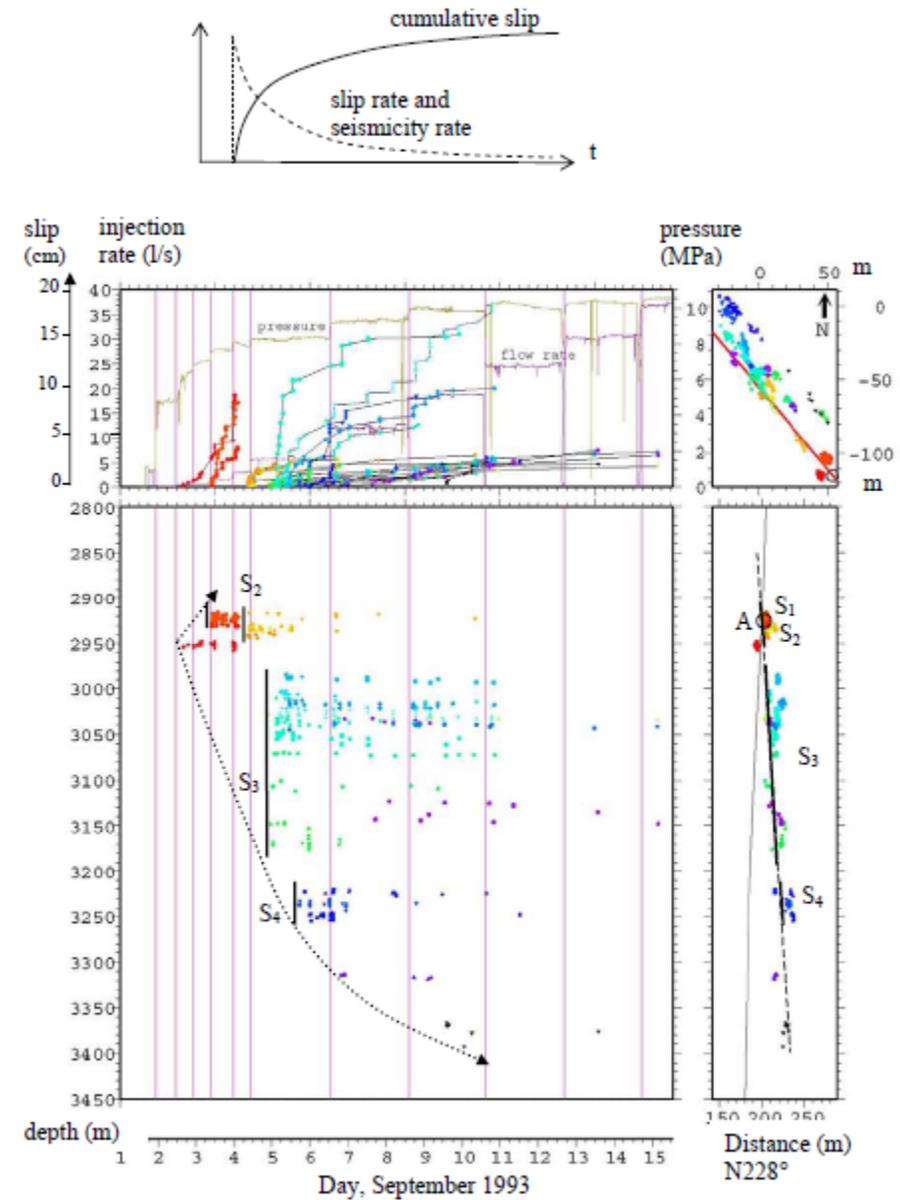
Une information importante encore manquante est la valeur de la pression au niveau des aspérités.

L'amplitude des déplacements cumulés sur chacun des multiplets n'est pas uniforme. Elles atteignent quelques centimètres

Quelle est l'amplitude des mouvements asismiques entre les aspérités?

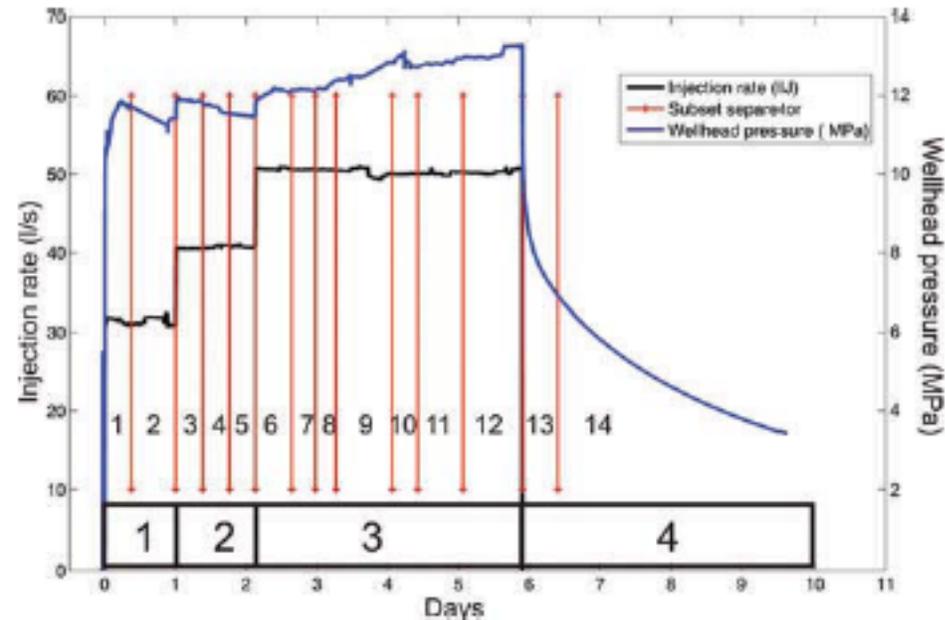
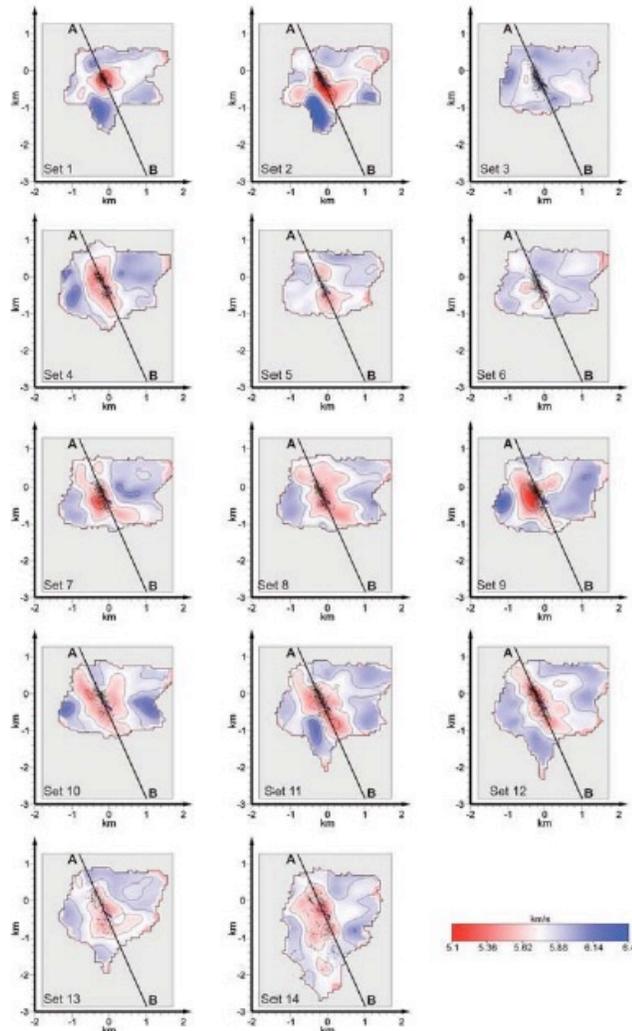
Peut-on évaluer les redistributions de contraintes liées aux multiplets ou utiliser les mécanismes au foyer pour caractériser les variations de contrainte à grande échelle ?

Deux types d'hétérogénéités: à l'échelle des aspérités, à l'échelle des mouvements asismiques.



Tomographie microsismique et mouvements asismiques

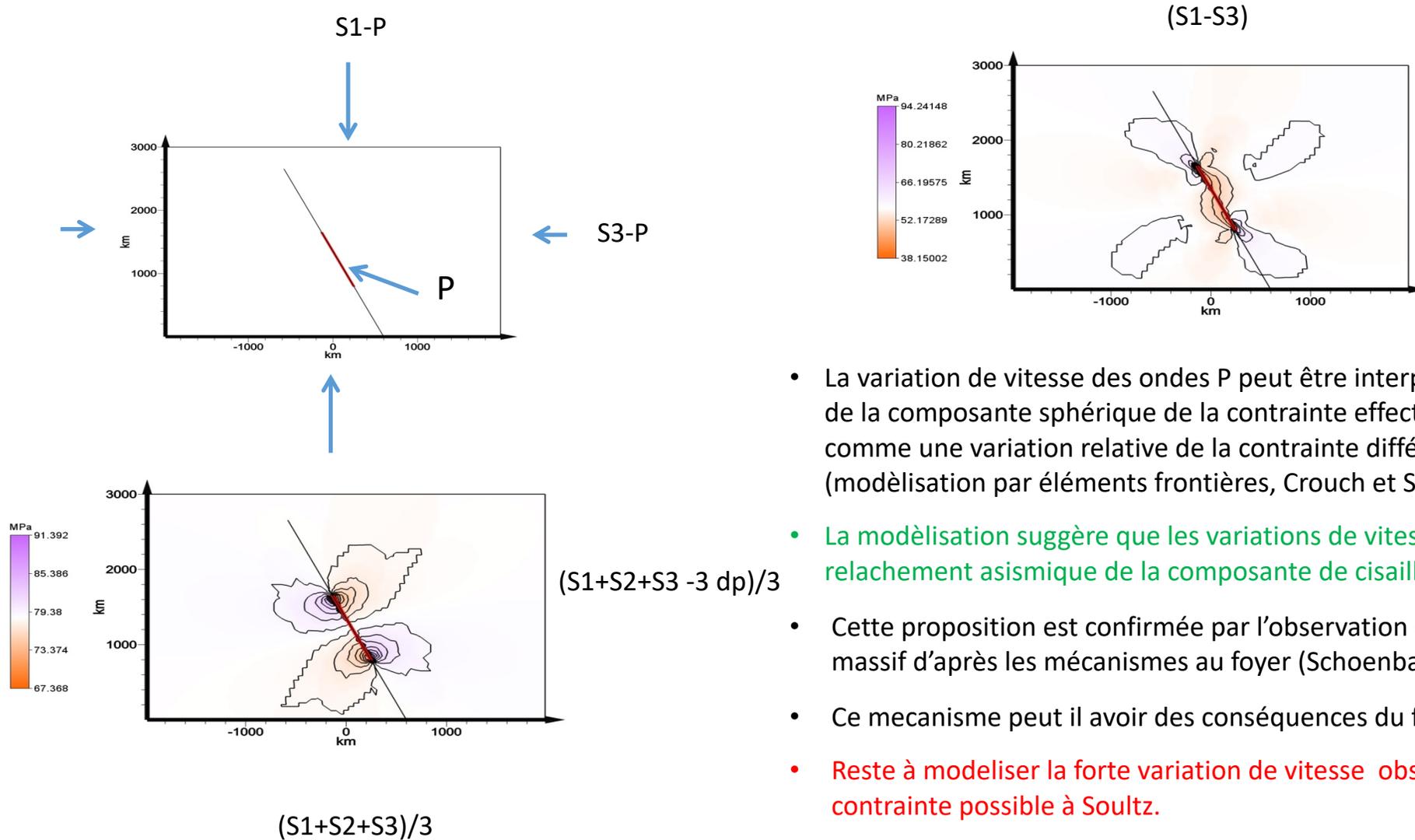
(Calo et al., GJI, 2007)



Variations au cours du temps de la vitesse des ondes P, détectées par tomographies répétées.

L'anomalie de vitesse disparaît pour les périodes 3 et 6, quand le débit d'injection augmente, ainsi donc que la pression d'injection .

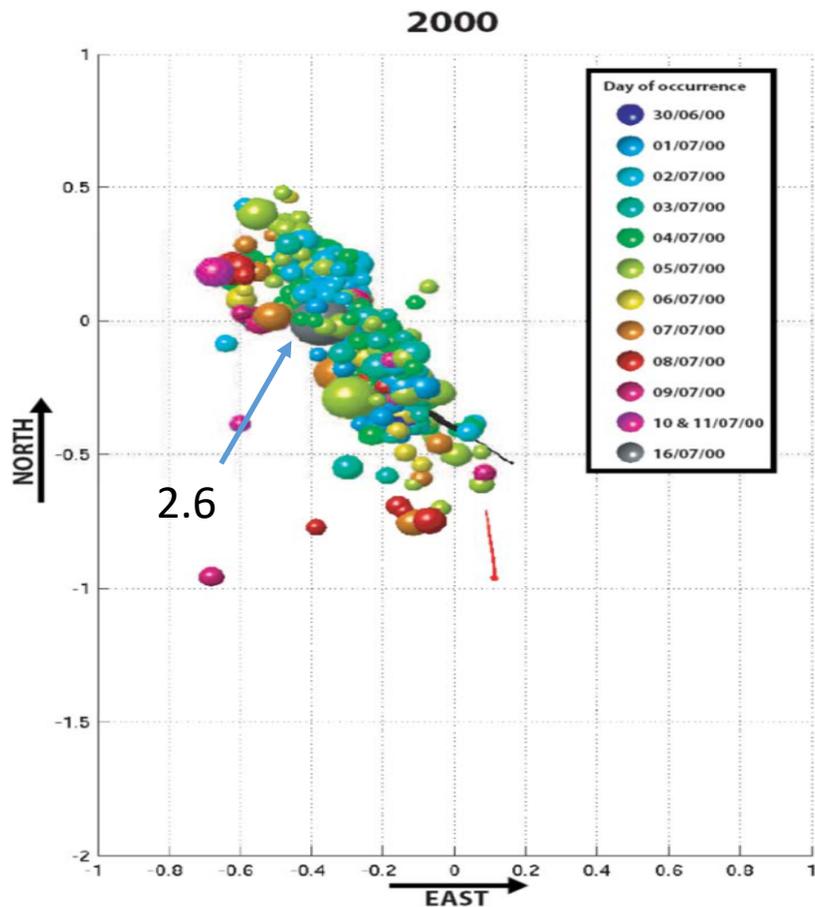
De l'effet d'une dislocation sur le champ de contrainte



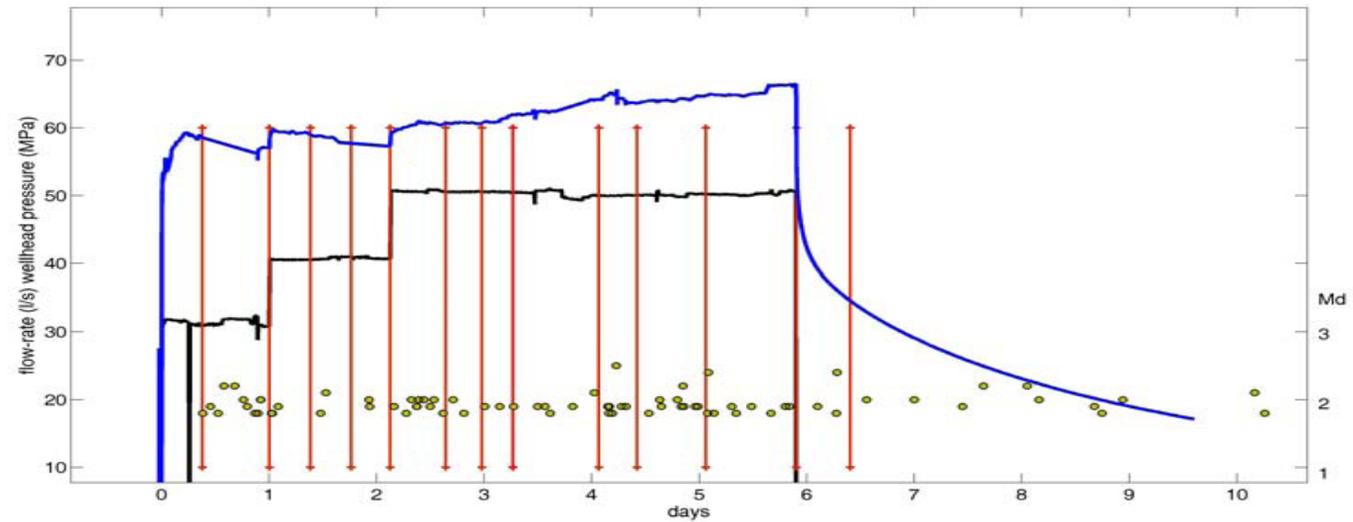
- La variation de vitesse des ondes P peut être interprétée soit comme une variation de la composante sphérique de la contrainte effective, $(S1+S2+S3-3dP)/3$, soit comme une variation relative de la contrainte différentielle effective $(S1-S3)/(S3-dP)$ (modélisation par éléments frontières, Crouch et Starfield, 1976; Cornet, 1979).
- La modélisation suggère que les variations de vitesse peuvent être liées à un relachement aismique de la composante de cisaillement le long de la faille.
- Cette proposition est confirmée par l'observation de variations de contrainte dans le massif d'après les mécanismes au foyer (Schoenball et al. 2014).
- Ce mecanisme peut il avoir des conséquences du fait du "pompage sismique".
- Reste à modeliser la forte variation de vitesse observée du fait de la faible chute de contrainte possible à Soultz.

« Gros » événements, percolation de fluide et mouvements lents: Le cas de Soultz

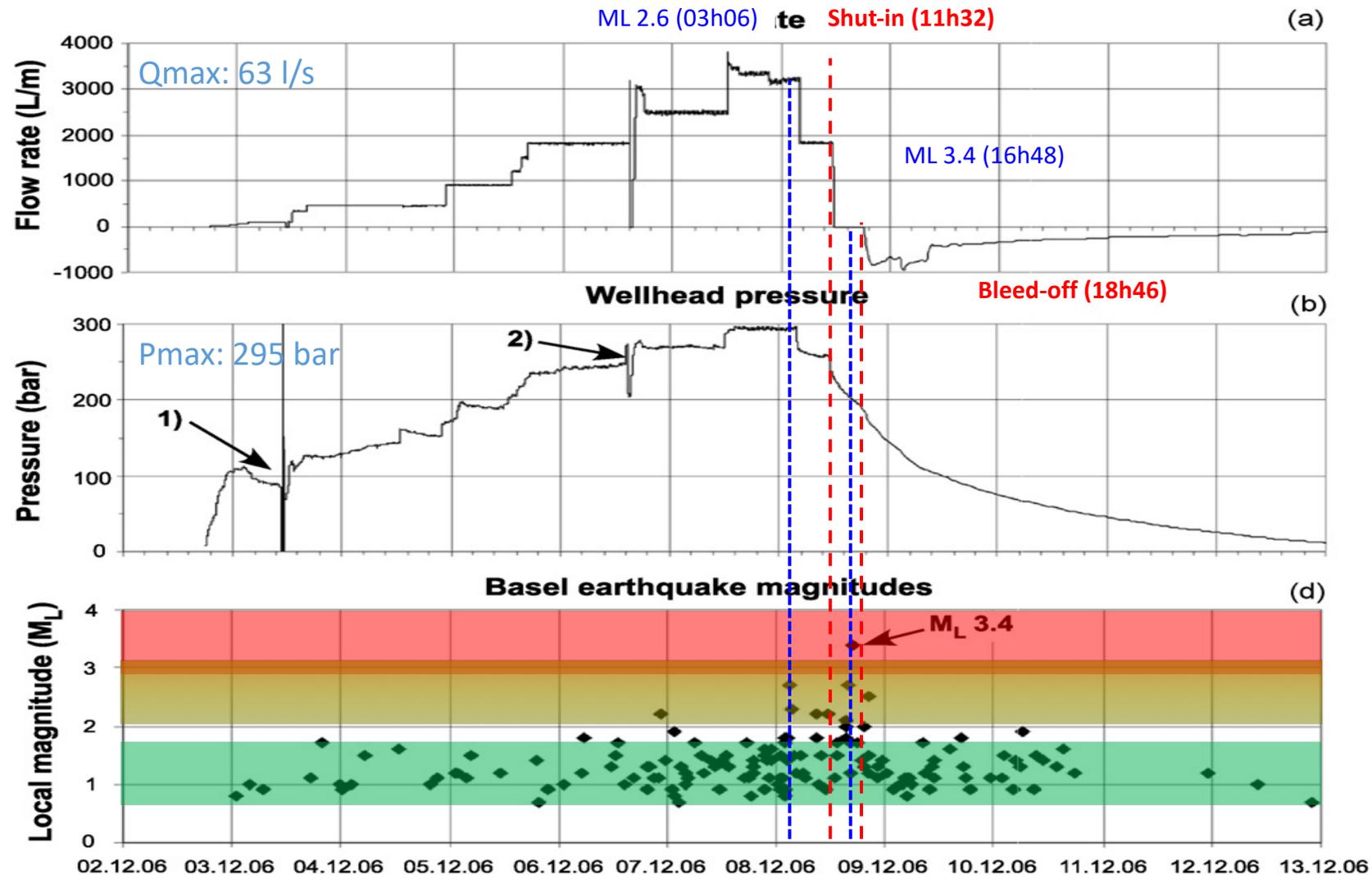
La plus grande magnitude (2.6) est intervenue 9 jours après l'arrêt de l'injection, et **1 jour après un court essai de production**



Distribution en fonction du temps des événements de magnitude supérieure à 1.7



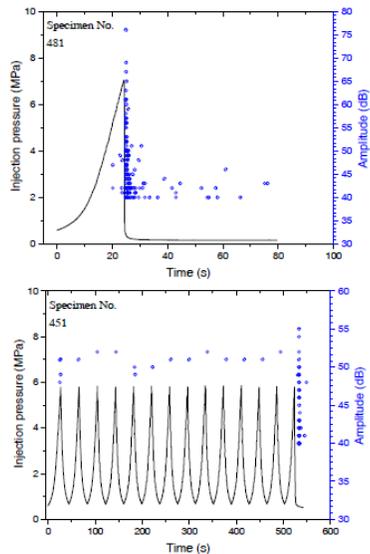
« Gros » événements, percolation de fluide et mouvements lents : Le cas de Bâle



1. ML=2.6 (orange)
2. Diminution de Q
3. Arrêt de l'injection
4. 4 hrs plus tard, ML=2.7
5. 1 hr plus tard ML=3.4
6. Drainage du système
7. 1h30 plus tard, ML=2.5
8. Janvier - Mars 2007: ML 2.9, 3.1, 3.2, 3.3

En guise de conclusion : Vers une stabilisation des stimulations par dilatance:

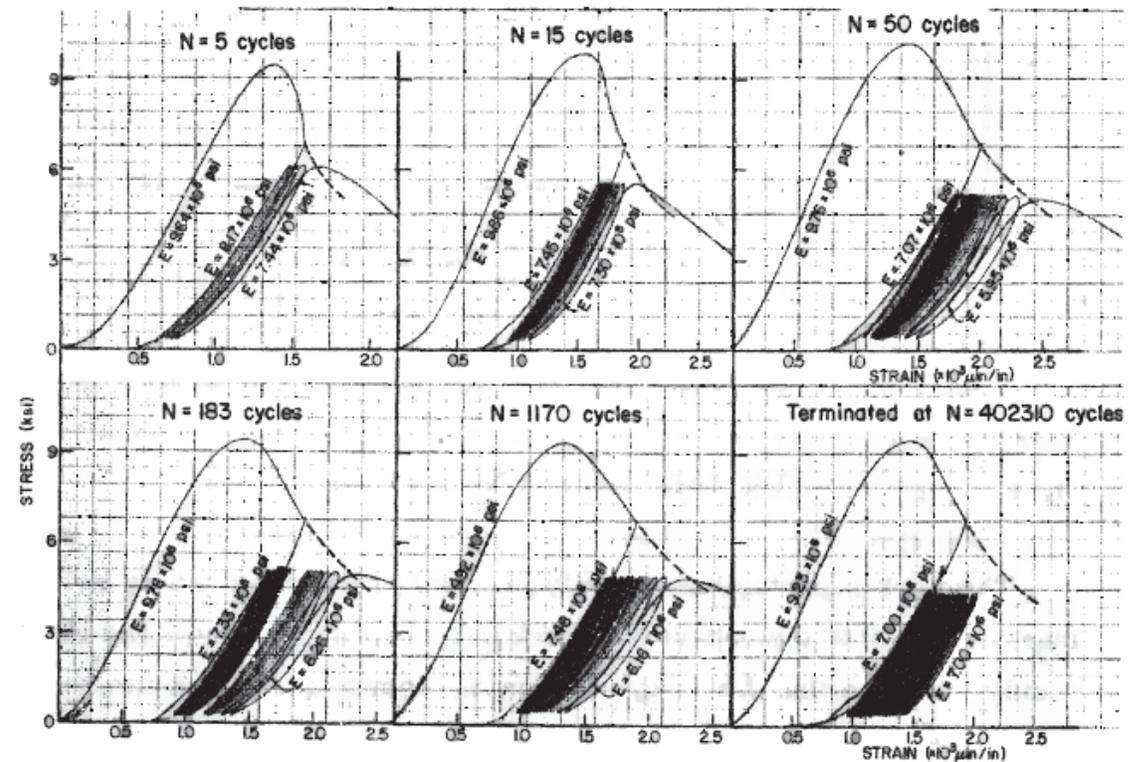
Evolution du protocole d'injection



pressurization cyclique testé au et al., 2013)

- Application à un site réel: Poang, Corée du sud; mais séisme de magnitude 5.8 en novembre 2017.

Application du principe de « fatigue »



Fatigue loading of a sample loaded beyond its peak bearing capacity (reproduced from Haimson and Kim, 1972, with permission from ASCE).